



**Jean Santarelli Monteiro de Castro**

**Estudo Experimental do Comportamento Mecânico e  
Hidráulico de Descontinuidade de Rocha Gnáissica Sob  
Carregamento Cisalhante Cíclico Pré-pico.**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Raquel Quadros Velloso  
Coorientador: Dr. Alexandr Zhemchuzhnikov

Rio de Janeiro  
Maio de 2022



**Jean Santarelli Monteiro de Castro**

**Estudo Experimental do Comportamento Mecânico e  
Hidráulico de Descontinuidade de Rocha Gnáissica Sob  
Carregamento Cisalhante Cíclico Pré-pico.**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Prof<sup>a</sup>. Raquel Quadros Velloso**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - PUC-Rio

**Dr. Alexandr Zhemchuzhnikov**

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

**Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Junior**

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

**Prof. Antônio Claudio Soares**

UFF

**Dra. Flávia de Oliveira Lima Falcão**

Petróleo Brasileiro S.A.

**Prof. Emilio Velloso Barroso**

UFRJ

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

**Jean Santarelli Monteiro de Castro**

Graduou-se em geologia pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em 2013. Em 2016 concluiu o Mestrado em Engenharia Civil na PUC-Rio na área de Geotecnia, seguindo as linhas de pesquisa de Mecânica das Rochas e Escavações Subterrâneas. Em 2016 ingressou no curso de Doutorado na mesma instituição.

Ficha Catalográfica

Castro, Jean Santarelli Monteiro de

Estudo experimental do comportamento mecânico e hidráulico de descontinuidade de rocha gnáissica sob carregamento cisalhante cíclico pré-pico / Jean Santarelli Monteiro de Castro; orientadora: Raquel Quadros Velloso; coorientador: Alexandr Zhemchuzhnikov. – 2022.

132 f.: il. color.; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 20.  
Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Cisalhamento cíclico pré-pico. 3. Descontinuidades. 4. Maciços rochosos. 5. Rugosidade. 6. Abertura hidráulica. I. Velloso, Raquel Quadros. II. Zhemchuzhnikov, Alexandr. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus que tem me sustentado em todos os momentos, dando sempre paz ao meu coração, à minha esposa e à minha família.*

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade da vida, pelas pessoas que colocou em meu caminho e pela bondade e misericórdia em todos os momentos da minha vida.

À Gabriela, minha esposa, por todo amor e carinho e por estar construindo uma linda família ao meu lado.

Aos meus pais e minha irmã pelo imenso amor, apoio e dedicação.

À Prof<sup>ª</sup>. Raquel Velloso, orientadora e amiga, pela motivação, dedicação e incentivo ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, que alicerçaram minha formação pessoal e acadêmica.

Ao Professor Eurípedes Vargas, grande amigo, pelo apoio, sugestões e incentivo na realização deste trabalho. Sempre solícito e atencioso durante toda minha vida acadêmica.

Ao meu coorientador Alexandr, excelente profissional e amigo, por todo apoio durante a realização dos ensaios e desenvolvimento da tese.

À Prof<sup>ª</sup>. Michelle que sempre ajudou no meu crescimento acadêmico, me aconselhando e motivando nos momentos mais difíceis. Obrigado pela amizade oferecida por todo esse tempo.

Ao Saudoso amigo e Prof. Franklin Antunes, os preciosos ensinamentos sobre a vida que muito me enriqueceram para ser um ser humano cada vez melhor. Você faz muita falta.

A todos os amigos que fiz durante o curso pela amizade que construímos, em particular aquele que sempre esteve ao meu lado, meu grande amigo Bruno que está comigo desde os tempos da graduação.

A todos do Laboratório LEM-DEC da PUC, em especial, Euclides, Marques, Rogério e Jansen que sempre se mostraram solícitos e estiveram ao meu lado.

A Rita e Luana que sempre estão dispostas a ajudar e resolver todos os problemas do dia a dia.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## **Resumo**

Castro, Jean Santarelli Monteiro; Velloso, Raquel Quadros; Zhemchuzhnikov, Alexandr. **Estudo Experimental do Comportamento Mecânico e Hidráulico de Descontinuidade de Rocha Gnáissica Sob Carregamento Cisalhante Cíclico Pré-pico**. Rio de Janeiro, 2022. 132 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ao longo das últimas décadas, a cidade do Rio de Janeiro vem sofrendo com vários eventos de queda de blocos de rochas que não podem ser relacionados a quaisquer fatores desencadeantes evidentes, como temporadas de chuva ou eventos sísmicos. Assim, outros possíveis fenômenos iniciais ou causas foram avaliados e as variações térmicas naturais parecem ser um dos fatores desencadeantes que contribuem para esses eventos. O mecanismo associado à flutuação diária de temperatura é capaz de gerar deslocamentos irreversíveis, sendo um fator preparatório para as quedas de rochas. Em maciços rochosos fraturados, os blocos de rochas se expandem, empurram outros blocos em sua volta, se contraem, podendo ou não voltar para sua posição de origem, gerando movimentos cíclicos. O propósito principal deste trabalho é estudar o comportamento mecânico e hidráulico de descontinuidades de rochas gnáissicas sob carregamento cíclico cisalhante pré-pico para diferentes tipos de JRC (*Joint Roughness Coefficient*), variações da tensão normal entre 100 e 1000 kPa e da frequência entre 0,1 e 0,01 Hz, garantindo uma velocidade quase estática, simulando as condições de temperatura no campo. Foi possível verificar que o comportamento dos deslocamentos irreversíveis das amostras ensaiadas foi influenciado pela tensão cisalhante de pré-pico para tensões normais e frequências baixas e para tensões normais altas o deslocamento foi constante e quase estático, diminuindo pouco a resistência ao cisalhamento em 2000 ciclos e gerando níveis de deslocamentos irreversíveis bem mais baixos.

### **Palavras-chave**

Cisalhamento cíclico pré-pico; descontinuidade; gnaisse, rugosidade, abertura hidráulica.

## ***Abstract***

Castro, Jean Santarelli Monteiro; Velloso, Raquel Quadros; Zhemchuzhnikov, Alexandr. **Experimental Study of the Mechanical and Hydraulic Behavior of Gneissic Rock Joints Under Pre-Peak Cyclic Shear Loading**. Rio de Janeiro, 2022. 132 p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Over the last few decades, the city of Rio de Janeiro has been suffering from several rockfall events that cannot be related to any obvious triggering factors such as rainy seasons or earthquakes. Thus, other possible initial phenomena or causes were evaluated and natural thermal variations seem to be one of the triggering factors that contribute to these events. The mechanism associated with the daily fluctuation of temperature is capable of generating irreversible displacements, being a preparatory factor for rockfalls. In fractured rock mass, rock blocks expand, push other blocks around them, contract, and may or may not return to their original position, generating cyclical movements. The main purpose of this work is to study the mechanical and hydraulic behavior of gneiss rock discontinuities under pre-peak cyclic shear loading for different types of JRC (*Joint Roughness Coefficient*), normal stress variations between 100 and 1000 kPa and frequency variations between 0.1 and 0.01 Hz, ensuring an almost static speed, simulating the temperature conditions in the field. It was possible to verify that the behavior of the irreversible displacements of the tested samples was influenced by the pre-peak cyclic shear for normal stresses and low frequencies and for high normal stresses the displacement was constant and almost static, decreasing the shear strength in 2000 cycles and generating much lower levels of irreversible displacements.

## **Keywords**

Pre-peak cyclic shear; joints, gneiss, asperities, hydraulic aperture.

# Sumário

Sumário	8
1 Introdução	17
1.1 Motivação	18
1.2 Objetivos	19
1.3 Estrutura da tese	19
2 Revisão bibliográfica	20
2.1 Instabilidade de maciços rochosos	20
2.2 Efeito do carregamento cíclico na instabilidade de taludes rochosos	29
2.2.1 Resistência ao cisalhamento de descontinuidade e suas características	29
2.2.1.1 Rugosidade	30
2.2.1.2 Resistência da parede	32
2.2.1.3 Abertura da Fratura	33
2.2.1.4 Preenchimento	34
2.2.2 Cisalhamento cíclico	37
2.2.3 Cisalhamento cíclico com controle de deslocamento e avaliação da degradação da rugosidade	40
2.2.4 Cisalhamento cíclico com controle de tensão	43
2.2.5 Permeabilidade	47
3 Materiais e métodos utilizados na avaliação do comportamento mecânico e hidráulico de descontinuidades de rochas gnáissicas	51
3.1 Materiais	51
3.2 Contexto geológico local	52
3.2.1 Identificação da área de coleta	54
3.2.2 Caracterização estrutural	58
3.2.3 Preparação dos corpos de prova	59
3.3 Método	63
3.3.1 Análise Petrográfica	64
3.3.2 Caracterização dos Índices Físicos	65
3.3.3 Resistência à Compressão Uniaxial das Rochas	66
3.3.4 Ensaio Indireto de Resistência à Tração (Ens. Brasileiro)	67

3.3.5	Resistência ao Cisalhamento Direto	69
3.3.5.1	Cisalhamento Cíclico	69
3.3.5.2	Procedimento do ensaio	74
4	Apresentação e Análise dos Resultados	77
4.1	Análise Petrográfica	77
4.2	Caracterização por Índices Físicos	82
4.3	Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial	84
4.4	Ensaio Indireto de Resistência à Tração (Ens. Brasileiro)	85
4.5	Cisalhamento cíclico	86
4.5.1	Grupo baixa tensão normal (100 kPa) e frequência 0,1 Hz.	86
4.5.1.1	Cisalhamento cíclico x deslocamento cisalhante	86
4.5.1.2	Deslocamento acumulado e abertura hidráulica	90
4.5.1.3	Corpo de prova após o ensaio	95
4.5.2	Grupo baixa tensão normal (100 kPa) e frequência 0,01 Hz.	100
4.5.2.1	Cisalhamento cíclico x deslocamento cisalhante	100
4.5.2.1	Deslocamento acumulado e abertura hidráulica	101
4.5.2.2	Corpo de prova após o ensaio	103
4.5.3	Grupo alta tensão normal (1000 kPa) e frequência 0,1 Hz.	105
4.5.3.1	Cisalhamento cíclico x deslocamento cisalhante	105
4.5.3.1	Deslocamento acumulado e abertura hidráulica	109
4.5.3.2	Corpo de prova após o ensaio	115
5	Conclusão e Sugestões	121
5.1	Conclusões	121
5.2	Sugestões	123
6	Referências bibliográficas	124

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Fatores de movimento das vertentes. Adaptado de Popescu (1994).	20
Figura 2.2 - Modelo mostrando o período da evolução do escorregamento e o papel específico desempenhado por certos fatores desencadeadores, de acordo com Finlayson e Statham, e depois adaptado por Julian e Anthony (1996) <i>apud</i> Gunzburger (2005).	21
Figura 2.3 - Queda de blocos no sítio de "Rochers de Valabres" no Sul dos Alpes franceses e a geometria utilizada para modelagem numérica correspondente a um corte perpendicular ao vale. (Gunzburger <i>et al.</i> 2005).	23
Figura 2.4 - As microfissuras estão quase sempre alinhadas nos limites dos grãos ou planos de clivagem de quartzo e feldspato. Esta Figura mostra a propagação de uma fissura (em azul) nos primeiros poucos milímetros abaixo da superfície. (Hartlieb <i>et al.</i> 2016).	25
Figura 2.5 - Conjunto de dois blocos simulando a existência de uma fratura entre eles. (adaptado de Vargas <i>et al.</i> 2013).	26
Figura 2.6 - Variação da escala das rugosidades de descontinuidades medidas por diferentes ensaios (ISRM, 1981).	30
Figura 2.7 – Método de determinação da rugosidade da descontinuidade. (ISRM, 1981).	30
Figura 2.8 - Classificação da rugosidade através de perfis típicos de rugosidade (ISRM, 1981).	31
Figura 2.9 - Perfis de rugosidade Barton e Chouby, 1977.	31
Figura 2.10 - Método alternativo para estimar o JRC (Barton, 1982).	32
Figura 2.11 - Representação esquemática: a) descontinuidade fechada; b) descontinuidade aberta; c) descontinuidade preenchida (adaptado de ISRM, 1978).	33
Figura 2.12 – Esquemas de descontinuidades preenchidas (ISRM, 1981).	35
Figura 2.13 – Amplitude da rugosidade da parede e espessura do material de preenchimento de descontinuidade (ISRM, 1981).	36
Figura 2.14 - Modelo esquemático do ensaio de cisalhamento cíclico (Indraratna <i>et al.</i> 2012).	37
Figura 2.15 - Princípio do procedimento experimental de carga normal constante e rigidez normal constante (Poturovic <i>et al.</i> 2015).	38
Figura 2.16 - Fluxo de fluido em uma única fratura: (a) superfície da junta lisa e paralela, (b) superfície da junta rugosa natural (Cao <i>et al.</i> 2019).	48
Figura 3.1 – Frente de produção da Pedreira Bangu. Local de coleta dos blocos.	52
Figura 3.2 – Morro do Sandá, Pedreira Bangú e área de exploração. Fonte: Google Earth, acessado em 07.02.2022.	52

Figura 3.3 – Mapa geológico do Morro do Sandá. 1 – Gnaisses Pré-colisionais (Tonalito Gnaiss); 2 – Gnaiss Sin-colisionais (Granodiorito Gnaiss); 3 – Granito Tardi-colisional (Granito Favela) e 4 – Granito Pós-colisional (Granito Favela). Fonte: Porto Jr., R. e Valente, S. C. 1988.	53
Figura 3.4 – Frente da pedreira que não foi lavrada. Na parte superior do maciço ocorrem rochas alteradas com coloração marrom amarelada, fruto de processos intempéricos. Observar a linha marcando aproximadamente o contato da rocha sã com a medianamente alterada.	55
Figura 3.5 – (A) Rocha levemente alterada com fraturas interconectadas. (B) marcadores cinemáticos e falhas com dobras associadas (drag folds) indicando deformação rúptil/dúctil.	55
Figura 3.6 – Frente da pedreira – Local do ponto de coleta das amostras. Observar os planos de fraturas de direções N/NE - N/NW favorecendo o processo de alteração do maciço.	56
Figura 3.7 – Ponto de coleta das amostras. Notar a coloração amarronzada numa parte do dique que é fruto da alteração intempérica.	57
Figura 3.8 – Dique de Fonolito com coloração esverdeada e 2,5 metros de espessura cortando a rocha encaixante.	57
Figura 3.9 – Estereograma referente às medidas de foliação.	58
Figura 3.10 – Estereograma referente às medidas de fraturas.	58
Figura 3.11 – Diagrama de Roseta referente às medidas de fraturas.	58
Figura 3.12 – (a) Blocos retirados da pedreira, (b) Extração de testemunhos utilizando a perfuratriz da marca Hilti, modelo DD 200 e (c) Cortadora metalográfica, utilizada para cortar corpos de prova com 54 mm de diâmetro.	60
Figura 3.13 – Método para geração de fraturas	60
Figura 3.14 – Método proposto: a) posicionando o pente; b) tirando a fotografia no molde transparente; c) convertendo a fotografia em P&B; d) lendo um vetor da imagem; e) calculando os parâmetros e f) calculando o JRC. (Alameda <i>et al.</i> 2014).	61
Figura 3.15 – Organograma dos ensaios realizados.	64
Figura 3.16 – Microscópio óptico que será utilizado para realizar a análise petrográfica.	64
Figura 3.17 – (a) Dessecador e bomba de vácuo que serão utilizadas; (b) sistema montado para medir massa submersa e massa saturada.	66
Figura 3.18 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial realizado na máquina de ensaios universais da marca MTS, modelo 810.	67
Figura 3.19 – Ensaio para determinação da resistência à tração indireto (Ensaio Brasileiro).	68
Figura 3.20 – Representação esquemática do equipamento (Córdova Rodrigues, 2018).	70

Figura 3.21 – Representação esquemática do equipamento de cisalhamento direto com mudanças nas caixas de cisalhamento.	71
Figura 3.22 – Equipamento de cisalhamento direto com caixas modificadas.	71
Figura 3.23 – (a) Bomba Knauer com transdutor de pressão. As Figuras (b) e (c) mostram a entrada e saída da água.	72
Figura 3.24 – Preparação do corpo de prova nas caixas de cisalhamento.	73
Figura 3.25 – Equipamento com ensaio de cisalhamento cíclico (tensão normal de 100 kPa) em andamento.	73
Figura 3.26 – Exemplo da obtenção da porcentagem de material depositado no fundo da caixa. (A) imagem após o ensaio e (B) imagem processada em tons de preto e branco.	75
Figura 4.1 – Aspecto macroscópico dos blocos de rochas amostrados. a) Plagioclásio esbranquiçado devido à alteração hidrotermal e processos metamórficos; b) Padrão ortogonal provocado pela interseção de planos de fraturas ortogonais; c) Bandamento gnáissico fino bem marcado; d) Fratura associada à foliação; e) Bandamento gnáissico grosso bem marcado.	78
Figura 4.2 – Aspecto macroscópico dos blocos das rochas amostrados. a) Fratura conjugada em banda máfica com grande quantidade de biotita e hornblenda alterada; b) Veio pegmatítico; c) Rocha friável em zona homogênea com bandamento incipiente; d) ortognaisse preenchido com fonolito; e) Marcas de oxidação em planos de fratura.	79
Figura 4.3 – Fotomicrografia apresentando o aspecto geral da textura lepidonematoblástica apresentando o bandamento metamórfico/estrutural preservado.	80
Figura 4.4 – Fotomicrografia do quartzo Diorito. A) Textura nematoblástica; B) Fraturamento de grãos por stress deformacional; C) Controle da alteração imposta pelas fraturas; D) hornblenda alterada a partir dos planos de clivagens; E) Estruturação da hornblenda por conta do entrelaçamento dos planos de clivagem; F) Textura granoblástica. Legenda: pl: plagioclásio; hb: hornblenda; bt: biotita.	81
Figura 4.5 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras com JRC baixo (10-14).	86
Figura 4.6 – Gráfico do ensaio de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC baixo (10-14).	87
Figura 4.7 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC alto (14-18).	87
Figura 4.8 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC alto (14-18).	88
Figura 4.9 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 36.	90
Figura 4.10 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 31.	90

Figura 4.11 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 35.	91
Figura 4.12 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 05.	91
Figura 4.13 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 33.	92
Figura 4.14 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 03.	92
Figura 4.15 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 16.	93
Figura 4.16 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 38.	93
Figura 4.17 – Imagens das fraturas após o ensaio de cisalhamento cíclico para o grupo de amostras com JRC baixo.	95
Figura 4.18 – Imagens das fraturas após o ensaio de cisalhamento cíclico para o grupo de amostras com JRC alto.	96
Figura 4.19 – Imagens da fratura antes (a) e após (b) o ensaio de cisalhamento cíclico para as amostras 36, 05 e 38.	98
Figura 4.20 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC alto (14-18).	100
Figura 4.21 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 39.	101
Figura 4.22 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 48.	102
Figura 4.23 – Imagens das fraturas após o ensaio de cisalhamento cíclico para as amostras 39 (JRC baixo) e 41 (JRC alto).	103
Figura 4.24 – Imagens da fratura antes (a) e após (b) o ensaio de cisalhamento cíclico para as amostras 39 (JRC baixo) e 48 (JRC alto).	104
Figura 4.25 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC baixo (14-18).	105
Figura 4.26 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC baixo (14-18).	106
Figura 4.27 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC baixo (14-18).	106

Figura 4.28 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC baixo (14-18).	107
Figura 4.29 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 07.	109
Figura 4.30 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 08.	110
Figura 4.31 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 37.	110
Figura 4.32 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 47.	111
Figura 4.33 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 44.	111
Figura 4.34 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 21.	112
Figura 4.35 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 04.	112
Figura 4.36 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 45.	113
Figura 4.37 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 42.	113
Figura 4.38 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 40.	114
Figura 4.39 – Imagens das fraturas após o ensaio de cisalhamento cíclico para o grupo de amostras com JRC baixo.	116
Figura 4.40 – Imagens das fraturas após o ensaio de cisalhamento cíclico para o grupo de amostras com JRC alto.	117
Figura 4.41 – Imagens da fratura antes (a) e após (b) o ensaio de cisalhamento cíclico para as amostras 47 (JRC baixo), 44 (JRC alto), 45 (JRC alto) e 42 (JRC alto).	119

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Descrição da abertura (adaptado de ISRM, 1978).	34
Tabela 2 – Resumo dos parâmetros utilizados em cada estudo sob condições de controle de tensão.	46
Tabela 3 – Resumo da amostragem dos corpos de prova.	62
Tabela 4 – Resumo dos corpos de prova e condições de carregamento aplicada para cada ensaio.	76
Tabela 5 – Resumo da caracterização dos índices físicos.	82
Tabela 6 – Resultados das porosidades médias encontradas nos trabalhos citados.	83
Tabela 7 – Resultados dos pesos específicos médios encontradas nos trabalhos citados.	83
Tabela 8 – Resumo dos resultados do ensaio de compressão uniaxial.	84
Tabela 9 – Resumo dos resultados do ensaio brasileiro.	85
Tabela 10 – Estimativa do material cominuído depositado no fundo da caixa.	97
Tabela 11 – JRC antes e depois do ensaio de cisalhamento cíclico.	99
Tabela 12 – Estimativa em porcentagem do material cominuído depositado no fundo da caixa.	103
Tabela 13 – JRC antes e depois do ensaio de cisalhamento cíclico.	104
Tabela 14 – Estimativa em porcentagem do material cominuído depositado no fundo da caixa.	118
Tabela 15 – JRC antes e depois do ensaio de cisalhamento cíclico.	120

## Lista de Abreviações

<b>JRC</b>	<i>Joint roughness coefficient</i>
<b>UCS</b>	<i>Unconfined Compressive Strength</i>
<b>CNL</b>	<i>constant normal load</i>
<b>CNS</b>	<i>constant normal stress</i>
<b>ISRM</b>	<i>International Society for Rock Mechanics</i>
<b>LVDT</b>	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>

## Lista de Símbolos

<b>Q</b>	Vazão da fratura
<b>g</b>	Aceleração da gravidade
<b>v</b>	Viscosidade do fluido
<b>r<sub>o</sub></b>	Raio de entrada da água
<b>r<sub>i</sub></b>	Raio de externo da superfície da fratura
<b>Δh</b>	Diferença de pressão de entrada e saída de água
<b>eh</b>	Abertura hidráulica
<b>E<sub>m</sub></b>	Abertura mecânica
<b>σ<sub>t</sub></b>	Resistência a tração
<b>P</b>	Carga de ruptura
<b>d</b>	Diâmetro do corpo de prova
<b>t</b>	Espessura do corpo de prova
<b>Z<sub>2</sub></b>	<i>First-derivative root-mean-square</i>
<b>R<sub>p</sub></b>	<i>Roughness profile index</i>

# 1 Introdução

Ao longo das últimas décadas, a cidade do Rio de Janeiro vem sofrendo com vários eventos de queda de blocos de rochas que não podem ser relacionados a quaisquer fatores desencadeantes evidentes, como temporadas de chuva ou eventos sísmicos. Assim, outros possíveis fenômenos iniciais ou causas foram avaliados e as variações térmicas naturais parecem ser um dos fatores desencadeantes que contribuem para esses eventos. Vargas *et al.* (2013) apontam diversos eventos de quedas de rochas na cidade do Rio de Janeiro, propondo possíveis mecanismos de ocorrência com base em períodos secos, com pouca ou nenhuma chuva.

Na literatura técnica, vários mecanismos foram considerados na tentativa de explicar a instabilidade de maciços rochosos relacionados com flutuações diárias de temperatura. Propagação de fratura pela expansão e contração da rocha (Vargas *et al.* 2013), fadiga térmica (Gasc-Barbier *et al.* 2014), degradação das propriedades mecânicas da rocha pela expansão e contração dos minerais (Villarraga *et al.* 2018) e mecanismo de deslizamento de bloco ou de fragmento de bloco em fraturas (Bakun-Mazor *et al.* 2013; Pasten *et al.* 2015) têm sido sugeridos como fatores desencadeantes de deslizamentos. Vários destes estudos concentraram-se na identificação dos mecanismos de ruptura ao longo de descontinuidades pré existentes relacionados às flutuações diárias de temperatura, contudo os deslocamentos não recuperáveis de blocos ao longo do tempo não são abordados.

Diversos autores já abordaram, experimentalmente, o efeito do carregamento cíclico na resistência ao cisalhamento de fraturas em rochas naturais e sintéticas. A maioria desses ensaios foi realizada com a condição de deslocamento cíclico controlado observando a variação da tensão cisalhante de ruptura associada a grandes terremotos (Plesha, 1987; Hutson e Dowding, 1990; Lee *et al.* 2001; Mirzaghobanali *et al.* 2014; Shrivastava e Rao, 2015; Wen-Chen *et al.* 2018; e Han *et al.* 2019). Contudo, poucos autores, como Jafari *et al.* (2003), Jafari *et al.* (2004), Fathi *et al.* (2016), Liu *et al.* (2018) e Kou *et al.* (2019) realizaram ensaios cíclicos pré-pico com tensão cisalhante controlada para estudar o efeito de pequenos terremotos e danos por fadiga em juntas de rochas sintéticas. Durante cada pequeno

terremoto, algumas pequenas mudanças ocorrem nos maciços rochosos ao longo das superfícies das juntas e descontinuidades. O acúmulo dessas mudanças durante eventos sísmicos repetitivos pode causar deslocamentos consideráveis. Alguns resultados do carregamento sísmico repetitivo em maciços rochosos são o acúmulo de pequenos deslocamentos, fadiga cíclica, degradação das asperezas e etc. (Jafari *et al.*, 2004).

Ademais, parte desses autores avaliaram o efeito do carregamento cíclico na resistência através de ensaios com o controle de deslocamento (o que impossibilita a quantificação do deslocamento irrecuperável).

Diante disso, o presente estudo pretende contribuir para um melhor entendimento das diversas quedas de blocos que ocorreram na cidade do Rio de Janeiro através do efeito do carregamento cíclico pré-pico no deslocamento cisalhante acumulado em fraturas de rochas gnáissicas. Foram realizados diversos ensaios de cisalhamento cíclico para diferentes tipos de JRC (coeficiente de rugosidade da fratura) com variação da tensão normal para simular condições de talude em superfície. Acredita-se que o JRC influencia no deslocamento acumulado ao longo do tempo. Uma bomba de água, para geração de fluxo na fratura, foi acoplada ao equipamento de cisalhamento direto para avaliar o comportamento da abertura hidráulica durante o ensaio. Também foi realizada a caracterização mecânica da rocha utilizando ensaios de tração indireta (Brasileiro), resistência à compressão uniaxial (UCS) e caracterização dos índices físicos.

## 1.1 Motivação

O mecanismo associado à flutuação diária de temperatura é capaz de gerar deslocamentos irreversíveis, conforme observado por Gunzburger *et al.* (2005), Merrien-Soukatchoff *et al.* (2010), Gasc-Barbier *et al.* (2014) e Bakun-Mazor *et al.* (2013), sendo um fator preparatório para as quedas de rochas. Em maciços rochosos fraturados, os blocos de rochas se expandem, empurram outros blocos em sua volta, se contraem e voltam para sua posição de origem, gerando movimentos cíclicos.

A necessidade de uma melhor compreensão do comportamento dos deslocamentos irreversíveis de blocos rochosos relacionados às flutuações diárias de temperaturas, diante de diferentes tipos de rugosidades motivou o desenvolvimento do presente trabalho. Não há estudos envolvendo ensaios de

cisalhamento cíclico com fraturas naturais associados a deslocamentos cisalhantes acumulados no tempo.

## 1.2 Objetivos

A tese tem como objetivo principal estudar o comportamento mecânico e hidráulico de descontinuidade de rocha gnáissica sob carregamento cíclico cisalhante pré-pico a fim de se identificar comportamentos e parâmetros para o estudo de quedas de blocos de rochas relacionadas às flutuações diárias de temperatura.

## 1.3 Estrutura da tese

A tese será organizada em cinco capítulos. A parte introdutória será constituída da definição dos objetivos gerais e específicos, da justificativa e da motivação do estudo.

No Capítulo 2, será apresentada uma revisão da literatura existente, compreendendo os tópicos referentes aos principais assuntos abordados nesta pesquisa.

O capítulo 3 apresentará detalhadamente os materiais e métodos utilizados no programa experimental. Serão apresentados os equipamentos, *setups* e normas seguidas para a realização dos ensaios.

O capítulo 4 consistirá na apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos.

No Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões obtidas da realização deste trabalho, o cronograma das atividades e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Instabilidade de maciços rochosos

As instabilidades dos maciços rochosos podem ser desencadeadas por diversos fatores tais como: ação antrópica (cortes e aterros), perturbações causadas por atividade sísmica, variações de poro-pressão, ação do intemperismo e presença de fraturas que podem ou não estar preenchidas por água. Esses fatores podem ser divididos em fatores predisponentes, fatores de preparação e fatores desencadeantes. (Glade e Crozier, 2004).

Os fatores de predisposição são estáticos e intrínsecos ao terreno, condicionando o grau de instabilidade da vertente e determinando a suscetibilidade da região à instabilidade e geralmente associam-se às características do terreno (geologia e morfologia). Os fatores preparatórios são dinâmicos e diminuem a estabilidade sem iniciar o movimento. Por outro lado, os fatores desencadeantes representam a causa imediata da instabilidade e colocam em movimento uma massa que já se encontrava no limiar da ruptura. Os fatores preparatórios e desencadeantes, geralmente estão associados a processos geomorfológicos, processos naturais e antrópicos (Figura 2.1).

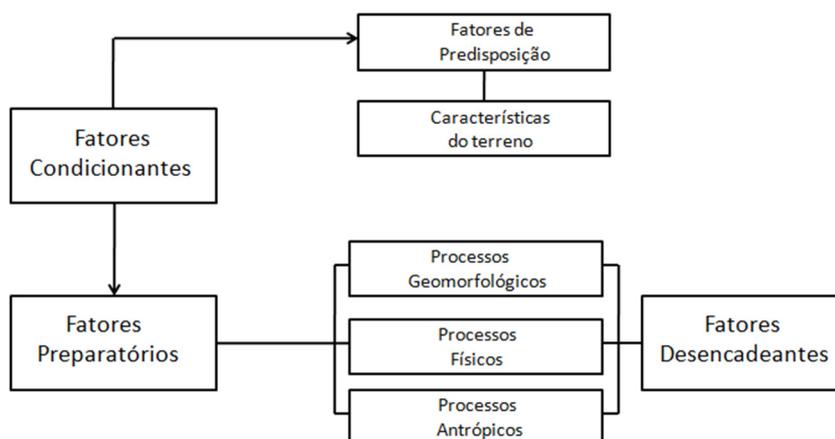


Figura 2.1 – Fatores de movimento das vertentes. Adaptado de Popescu (1994).

A distinção entre causas imediatas (como um forte terremoto) e menos imediatas (como o desgaste gradual) decorre do fato de que o primeiro age

instantaneamente, enquanto o segundo exerce um efeito cumulativo lento e, portanto, requer um longo período para se tornar efetivo, e, finalmente, induzir uma consequência importante. Essa diferença pode ser vista no modelo de sequenciamento de escorregamentos proposto por Finlayson e Statham e posteriormente adaptado por Julian e Anthony (1996) *apud* Gunzburger *et al.* (2005). Neste modelo esquemático (Figura 2.2), a ruptura (e queda de rochas subsequente) ocorre quando as forças perturbadoras que atuam sobre o maciço rochoso excedem sua resistência. Os pontos de 1 a 5 correspondem a casos em que as forças perturbadoras e a resistência são iguais. Do ponto de vista físico, vários estágios podem ser identificados da seguinte maneira:

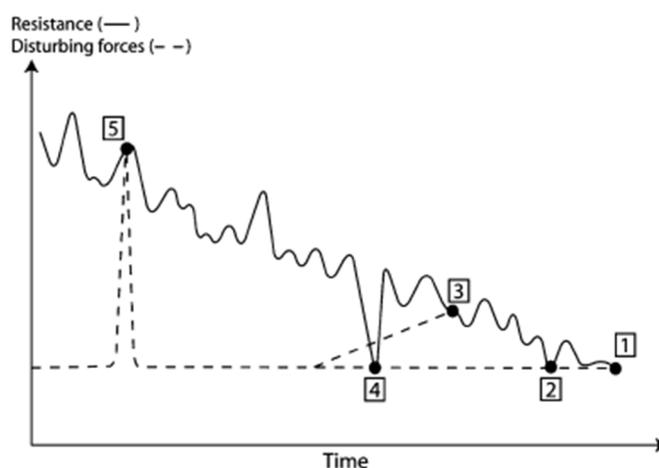


Figura 2.2 - Modelo mostrando o período da evolução do escorregamento e o papel específico desempenhado por certos fatores desencadeadores, de acordo com Finlayson e Statham, e depois adaptado por Julian e Anthony (1996) *apud* Gunzburger (2005).

Em longo prazo (entre aproximadamente  $10^4$  e  $10^6$  anos), a resistência diminui gradualmente devido ao desgaste geoquímico da rocha ou a processos de danos progressivos, e até que o limite de ruptura seja atingido (Ponto 1).

No médio e longo prazo (tipicamente  $10^2$ - $10^4$  anos), o aumento no ângulo de inclinação resultante da erosão pode induzir aumentos lentos de tensão até a ruptura (Ponto 2).

Oscilações de resistência e tensões de curto prazo (período de 1 a  $10^2$  anos) por exemplo, devido a mudanças sazonais, são sobrepostas a esses efeitos e podem levar à ruptura (Ponto 3).

Por último, fenômenos breves e violentos, como um forte evento de chuvas ou um forte terremoto, podem ser diretamente responsáveis por diminuir o nível de resistência (Ponto 4) ou por aumentar a magnitude das forças perturbadoras (Ponto 5) e levar à ruptura.

As causas de mudanças a médio e longo prazo nas forças de resistência são geralmente conhecidas como fatores preparatórios: para serem eficientes, seus pequenos (e quase imperceptíveis) efeitos devem ser acumulados até a ruptura. Causas relacionadas a mudanças no curto e médio prazo são frequentemente chamadas de fatores desencadeantes e constituem as causas mais diretas de ruptura. Essa distinção não deve obviamente ser interpretada como uma dicotomia, devido à existência de uma transição contínua entre fatores preparatórios e fatores desencadeantes. O foco principal inerente a este modelo é essencialmente transmitir a noção de que as quedas de rochas resultam de numerosas, complexas e interativas causas que podem atuar em tempos amplamente variáveis; portanto, nunca deve ser considerado que as quedas de rochas devam ter sido geradas apenas pelas mudanças mais recentes e aparentes. Além disso, fatores preparatórios e desencadeantes não agem de forma idêntica em todos os declives, visto que as condições iniciais não são as mesmas. Algumas encostas são de fato mais propícias do que outras à atividade de queda de rochas, devido a fatores como topografia, vegetação, parâmetros litológicos, geometria e densidade da fratura. Esses elementos serão referidos como fatores de predisposição. Ao contrário dos fatores preparatórios e desencadeadores que são definidos pelo seu período de ação, os fatores de predisposição não apresentam qualquer evolução ao longo do tempo; em vez disso, servem para definir a estrutura geral do talude que incita, em graus variados, o aparecimento de instabilidades (Gunzburger *et al.* 2005).

As instabilidades dos taludes rochosos ligados à degradação progressiva do maciço sob ciclos térmicos climáticos são representadas pela sequência que termina no ponto dois da Figura 2.2. De fato, a radiação solar e as variações da temperatura atmosférica induzem mudanças cíclicas na temperatura do maciço rochoso suscetíveis de induzir tensões internas e danos à rocha. Tal processo é geralmente imperceptível para um ciclo, mas sua acumulação ao longo de muitos ciclos leva a uma instabilidade do maciço sem nenhum fator desencadeante identificável (Viles, 2013 *apud* Diaz, 2018). Alterações de temperaturas anormais podem às vezes

acelerar o tempo de ruptura, aumentando o gradiente térmico no talude e, assim, o dano da rocha (Diaz, 2018).

O comportamento termomecânico dos maciços rochosos tem sido estudado principalmente em altos níveis de tensão com variação controlada da temperatura. O estudo de maciços rochosos submetidos à variação natural de temperatura possui um contexto diferente, pois estão sujeitos a baixos níveis de tensões, as fraturas no maciço podem ser amplamente abertas, a temperatura varia continuamente com diferentes períodos e as condições de contorno mecânicas e térmicas estão ligadas a uma dada topografia complexa (3D) (Merrien-Soukatchoff *et al.* 2010).

Os efeitos térmicos na superfície da rocha gerando deformações, através da expansão e contração e eventualmente seu fraturamento em resposta as variações cíclicas de temperatura podem desencadear queda de blocos. Gunzburger *et al.* (2005) descreveram uma queda de rochas numa encosta de rocha gnáissica chamada Rochers de Valabres na região dos Alpes, no Sul da França e discutiram um mecanismo possível para a ocorrência deste desabamento. Através de um modelo numérico, os autores demonstraram que os deslocamentos induzidos termicamente nas discontinuidades podem ser suficientes para causar deslocamento gradual de um bloco de rocha localizado em uma posição de risco (Figura 2.3).

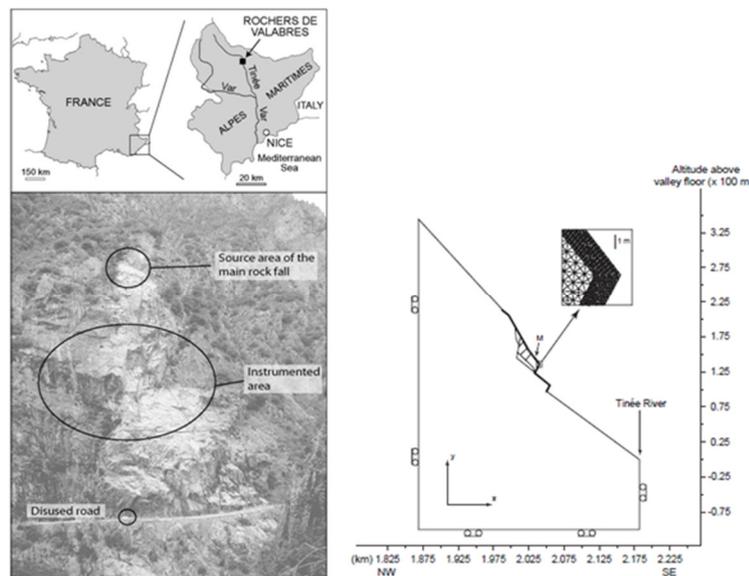


Figura 2.3 - Queda de blocos no sítio de "Rochers de Valabres" no Sul dos Alpes franceses e a geometria utilizada para modelagem numérica correspondente a um corte perpendicular ao vale. (Gunzburger *et al.* 2005).

Durante vários anos, diversas observações *in situ* validaram o papel das variações de temperatura na desestabilização do maciço rochoso de Rochers de Valabres. Merrien-Soukatchoff *et al.* (2010) estudaram através de células termomecânicas, soluções analíticas e modelagem, em um meio elástico semi-infinito, a influência da variação da temperatura e tensão num furo de 50 cm na superfície do maciço rochoso. As medições mostraram que as deformações axiais aumentaram com o aumento da temperatura (9° à 30°C), porém diversos dados permaneceram heterogêneos para estudar com precisão as deformações devido a variações de temperatura e, principalmente, o papel da geometria e das fraturas no local. Clement *et al.* (2008a) descrevem medições de tensões no maciço rochoso gnáissico de Rochers Valabres usando um método de overcoring/ sobre-furação (medição de tensão e deformabilidade). Os resultados indicaram que o estado de tensão na área da superfície da rocha é bastante heterogêneo e pode estar relacionando com a topografia da região.

Em “La Roque Gageac”, uma aldeia localizada perto de Bergerac na França, um evento de quedas de rochas ocorreu numa falésia composta por calcário arenoso. Gasc-Barbier *et al.* (2014) mostraram que o dano da rocha calcária (micro fraturas) submetida à fadiga térmica (ciclos variando entre 10 e 50 ° C) aumenta significativamente após cerca de 300 ciclos (diminuição nas velocidades das ondas de compressão). Os autores realizaram ensaios uniaxiais e medidas das velocidades das ondas elásticas ( $V_p$ ,  $V_{s1}$  e  $V_{s2}$ ) diariamente durante três meses, o que corresponde a mais de 700 ciclos térmicos, observando que as velocidades da onda de cisalhamento não apresentam uma evolução típica e permanecem quase constantes durante o experimento. No entanto, durante os primeiros 45 dias (250 a 300 ciclos) não se observou uma evolução significativa de  $V_p$  e, em seguida, registrou uma diminuição significativa, devido ao aparecimento de microfissuras na amostra. No estudo mais recente, Gasc-Barbier *et al.* (2021) usaram dados de 5 anos de monitoramento *in situ* de fraturas em rocha calcária no penhasco de “La Roque Gageac” e concluíram que a variação térmica sazonal e fraturas subcríticas afetam a rocha em profundidades de até 6 m. Vilarraga *et al.* (2018) destacam os efeitos importantes que os ciclos de temperatura têm sobre as propriedades mecânicas das rochas, mesmo para amplitudes moderadas do ciclo. Segundo esses autores, as degradações da rocha por ciclos térmicos não geram fraturas ou fissuras visuais na amostra, esse dano é essencialmente devido a processos que atuam na

microescala, como geração e propagação de microfissuras internas. Esse mecanismo é consistente com o proposto por Hartlieb *et al.* (2016) que estimam que essas características se desenvolvam essencialmente nos contatos de grãos (Figura 2.4).

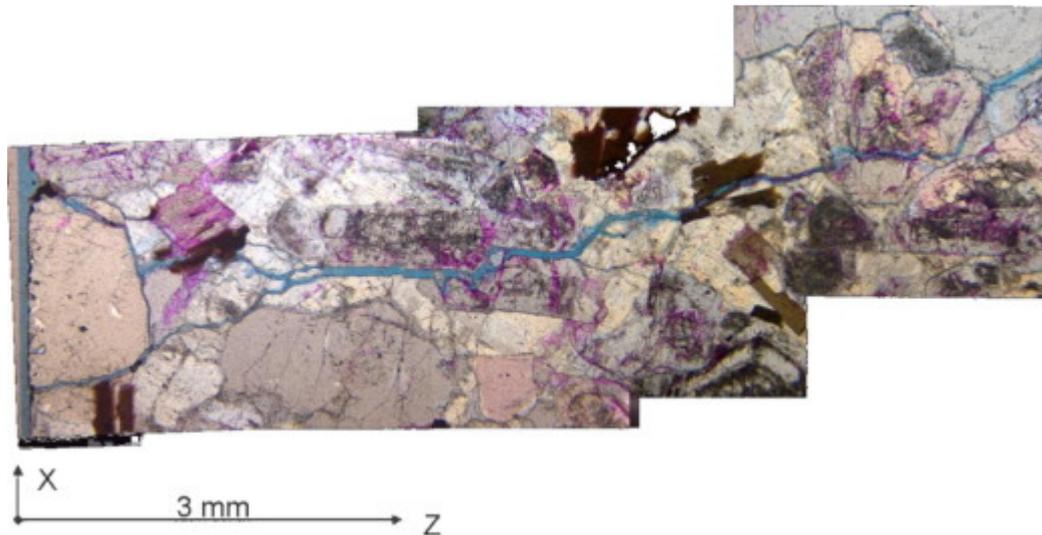


Figura 2.4 - As microfissuras estão quase sempre alinhadas nos limites dos grãos ou planos de clivagem de quartzo e feldspato. Esta Figura mostra a propagação de uma fissura (em azul) nos primeiros poucos milímetros abaixo da superfície. (Hartlieb *et al.* 2016).

As tensões térmicas cíclicas são consideradas um operador de processos de fadiga microestrutural responsáveis pelo intemperismo mecânico da rocha e capaz de induzir deformações plásticas. Esses efeitos não se limitam às porções mais rasas do maciço rochoso, mas podem se estender mais profundamente como resultado da propagação de trincas existentes em sua ponta por tensões termicamente induzidas (Vargas *et al.* 2013).

Vargas *et al.* (2013) descreveram diversos eventos de queda de blocos na cidade do Rio de Janeiro que não estão relacionados com períodos de chuvas, sem a presença de água, propondo um estudo experimental visando acompanhar a evolução térmica de um bloco provido de uma fratura (Figura 2.5). Os autores concluíram que flutuações diárias de temperatura, especialmente durante os meses mais frios do ano, podem criar condições de tensões no interior do maciço rochoso capazes de propagar fraturas não persistentes existentes e, finalmente, levar à ruptura da encosta.

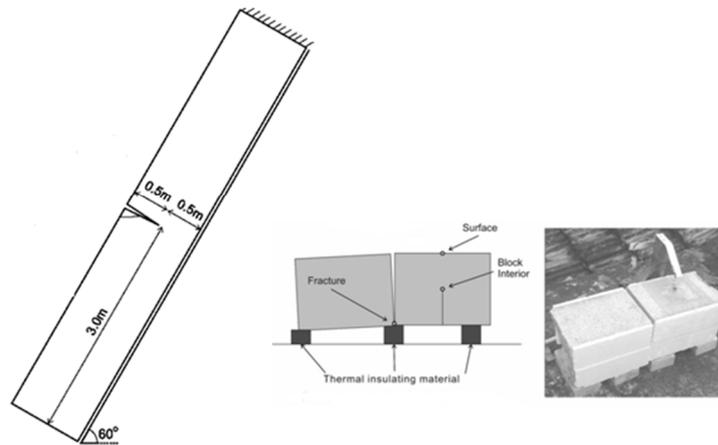


Figura 2.5 - Conjunto de dois blocos simulando a existência de uma fratura entre eles. (adaptado de Vargas *et al.* 2013).

Segundo Vicko *et al.* (2009), as oscilações de temperatura naturais diurnas ou anuais podem induzir efeitos termomecânicos de longo prazo nos maciços rochosos, sendo capazes de influenciar na integridade de patrimônios naturais ou culturais. Os efeitos termomecânicos são causados por ciclos de expansão e contração na rocha, que podem operar por longos anos, induzindo a concentração de tensões cumulativas ao longo das descontinuidades e promovendo deformações irreversíveis (Collins e Stock, 2016). Greif *et al.* (2016) detectaram a existência de deformação induzida termicamente, compreendendo tanto movimentos quase cíclicos (reversíveis) quanto deslocamentos irreversíveis (plásticos) no maciço rochoso arenítico do Arco da Rocha de PravcickaBraná, na República Tcheca. Fiorucci *et al.* (2018) avaliaram a resposta térmica de um bloco de rocha fraturado monitorado por 2 anos em uma pedreira abandonada em Acuto (região central da Itália). Os autores enfatizaram o papel das descontinuidades na propagação de calor, destacando possíveis implicações para instabilidades dos maciços rochosos induzidas termicamente devido aos mecanismos de falha de blocos planos ou em cunha.

Bakun-Mazor *et al.* (2013) desenvolveram um novo modelo, denominado encunhamento (wedging–ratcheting failure mechanism), para o deslocamento de blocos induzido termicamente em encostas rochosas fraturadas usando dados

térmicos e de deslocamento dos blocos monitorados nas encostas da montanha de Massada, Israel. Os autores afirmam que, para uma janela de tempo de 5000 anos, o deslocamento observado de 200 mm de um bloco de rocha dolomítica da encosta é mais provável que tenha sido controlado termicamente, em vez de um evento sísmico. Este resultado implica que em regiões climáticas onde a amplitude da temperatura ao longo de um ciclo sazonal é alta o suficiente, os deslocamentos induzidos termicamente desempenham um papel importante na erosão de taludes rochosos. Bakun-Mazor *et al.* (2020) simulou em laboratório o mecanismo de encunhamento através de um conjunto de blocos de concreto com um sistema de medição rastreando o deslocamento do bloco e a evolução da temperatura ao longo do tempo. Aplicando uma abordagem numérica, os autores concluíram que apenas o carregamento térmico pode explicar o deslocamento acumulado de 200 mm na montanha de Massada.

Para explicar como as oscilações térmicas cíclicas induzem a expansão e contração intermitentes de uma trinca por tensão, causando assim o deslocamento de blocos rochosos, um modelo analítico para o mecanismo de cunha induzido termicamente foi sugerido por Pasten (2013). A magnitude desses deslocamentos depende da configuração geométrica dos componentes, das propriedades termomecânicas dos materiais e interfaces e da temperatura. Em seu trabalho, Pasten (2013) validou experimentalmente o modelo analítico utilizando um sistema de blocos de acrílico com 200 mm de comprimento e mostrou que os ciclos de aquecimento e resfriamento causam acúmulo de deslocamento permanente (plástico) a uma taxa de 0,5 mm ao ano, proporcional à amplitude ( $10^{\circ}$  C) da mudança na temperatura.

As características mais comuns geradas pela aplicação cíclica de tensões com origem no calor são: movimentos não reversíveis de blocos de rochas ao longo de fraturas pré-existentes quando submetidos à carga térmica (Vicko *et al.* 2009; Gunzburger *et al.* 2005; Fiorucci *et al.* 2018; Greif *et al.* 2016), propagação de fratura pela expansão e contração da rocha (Vargas *et al.* 2013), fratura por mecanismos de fadiga térmica (Clement *et al.*, 2008a; Gasc-Barbier *et al.* 2014; Merrien-Soukatchoff *et al.* 2010; Merrien-Soukatchoff e Gasc-Barbier, 2017), mecanismo de encunhamento de bloco (Bakun-Mazor *et al.* 2013, Pasten, 2015) e degradação das propriedades mecânicas da rocha por expansão e contração dos minerais (Vilarraga *et al.* 2018). Grande parte dos autores citados, focaram seus

estudos em observações *in situ*, qualitativas e não consideram o deslocamento irreversível pré-pico de blocos.

A aplicação cíclica de tensão é responsável por movimentos reversíveis e irreversíveis de blocos de rocha ao longo de fraturas pré-existentes, sendo um fator preparatório para quedas de rochas com efeito cumulativo no dia a dia. O mecanismo associado a essa hipótese é que as deformações induzidas termicamente podem ser suficientes para gerar movimentos irreversíveis através da contração e expansão de blocos de rocha. Os blocos de rocha se expandem, empurram outros blocos em sua volta, se contraem e voltam para sua posição de origem, gerando movimentos cíclicos. O comportamento das fraturas do maciço rochoso sob um carregamento cíclico depende de suas propriedades superficiais, tais como rugosidade, resistência, espaçamento, preenchimento etc. (Jafari *et al.* 2003).

A tensão cíclica pode causar ruptura por cisalhamento (por exemplo, fortes terremotos) ou causar danos no comportamento pré-pico das descontinuidades (pequenos movimentos ou fracos terremotos). Essa tensão pode mudar como resultado de variações em rugosidades de segunda ordem devido a pequenas cargas cíclicas, enquanto altas cargas cíclicas afetam rugosidades de primeira ordem (Fathi, 2006).

Segundo Li e Sun (2019), quando a tensão normal é baixa, a junta da rocha falha devido ao deslizamento dos planos rugosos uns contra os outros. Nessas circunstâncias, a dilatação domina o modo de ruptura por cisalhamento. Se a tensão normal aumentar para um nível alto, as rugosidades são gravemente danificadas. Ou seja, o comportamento de cisalhamento da descontinuidade é controlado pela degradação da rugosidade. A dilatação e a degradação da rugosidade ocorrem simultaneamente para uma junta de rocha submetida a cisalhamento sob condições não extremas de tensão normais.

De acordo com dados do Centro Nacional de Informações sobre Terremotos do Serviço Geológico dos EUA, o número de pequenos terremotos é muito maior que o número de grandes terremotos (99% com magnitude inferior a 4,9 e 90% com magnitude inferior a 3,9 na escala Richter). Durante cada pequeno terremoto, ocorrem pequenas alterações ao longo das descontinuidades e o acúmulo dessas alterações pode induzir altas concentrações de tensão na rugosidade das descontinuidades. As condições de carregamento cíclico de pequeno deslocamento ocorrem principalmente no estágio pré-pico de cisalhamento (Fathi *et al.* 2016).

Diversos estudos se concentram na determinação das condições de cisalhamento cíclico de pico e pós pico, que correspondem principalmente a fortes tremores, no entanto, estudos sistemáticos sobre cisalhamento cíclico pré-pico em juntas de rochas, que correspondem a pequenos tremores repetitivos ou danos por fadiga na instabilidade de blocos devido ao cisalhamento das suas descontinuidades, são pouco abordados.

## **2.2 Efeito do carregamento cíclico na instabilidade de taludes rochosos**

### **2.2.1 Resistência ao cisalhamento de descontinuidade e suas características**

A importância das descontinuidades assenta no fato de serem elas que governam em regra o comportamento mecânico do maciço pois são as estruturas menos resistentes, designadamente nas situações de ruptura relacionadas com deslizamentos verificados ao longo de superfícies de anisotropia bem definidas. A caracterização das descontinuidades e o estudo da intensidade do fraturamento dos maciços rochosos são muito importantes para entender o comportamento do maciço antes, durante e depois da escavação. Os tipos mais frequentes de descontinuidades são as falhas, superfícies de estratificação, foliação, diaclases, clivagem de fraturas e xistosidade. Contudo as designações geológicas por si só raramente fornecem informações detalhadas das propriedades das descontinuidades, sendo assim, a descrição das diferentes famílias de descontinuidades torna-se fundamental e deve incluir características como a orientação, persistência (que também pode ser designada continuidade), espaçamento, rugosidade, resistência das paredes, abertura, preenchimento e infiltrações, segundo a ISRM (1978) e Hoek e Bray (1981). Neste capítulo iremos discutir apenas os conceitos de rugosidade, resistência da parede e preenchimento.

### 2.2.1.1 Rugosidade

A rugosidade é uma componente potencialmente importante na resistência ao cisalhamento de descontinuidades, especialmente no caso de fraturas não preenchidas.

Distinguem-se duas escalas de rugosidades nas paredes das descontinuidades. A primeira é caracterizada por ondulações que podem atingir até dezenas de metros (Figura 2.6). A segunda refere-se à rugosidade de pequena escala, que afeta comprimentos menores.

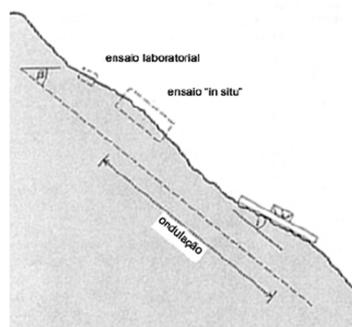


Figura 2.6 - Variação da escala das rugosidades de descontinuidades medidas por diferentes ensaios (ISRM, 1981).

A ISRM (1981) propõe diferentes métodos para determinação da rugosidade. Por exemplo, a rugosidade pode ser determinada por meio de bússola e clinômetro de disco (método de Feckers e Rengers), de diâmetros que variam de 5 a 40 cm, os quais fornecem a direção de mergulho de cada posição do disco sobre a rugosidade, como exemplificado na Figura 2.7.

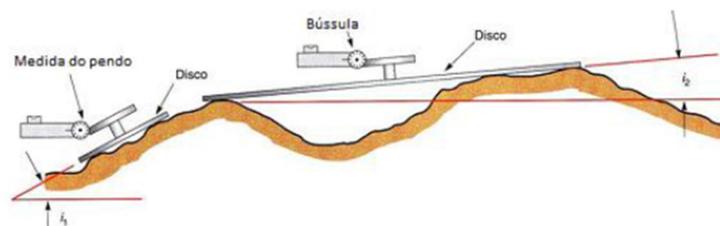


Figura 2.7 – Método de determinação da rugosidade da descontinuidade. (ISRM, 1981).

Caso haja limitações que impeçam as determinações antes referidas, a descrição da rugosidade poderá limitar-se à utilização de termos qualitativos, baseados em escalas de observação, usando como referência os perfis de rugosidade

apresentados nas Figuras 2.8 e 2.9, método utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

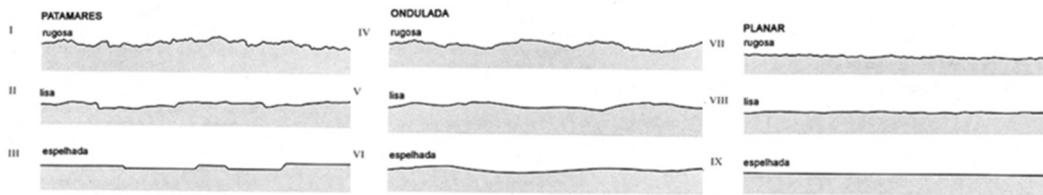


Figura 2.8 - Classificação da rugosidade através de perfis típicos de rugosidade (ISRM, 1981).

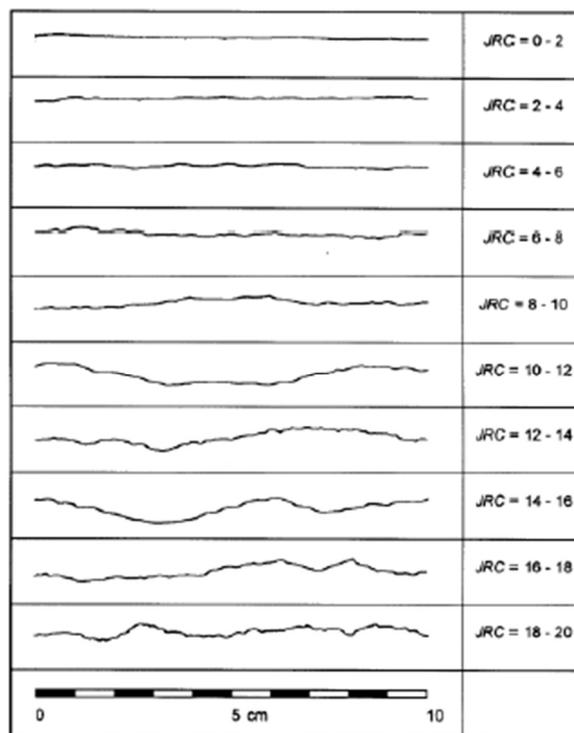


Figura 2.9 - Perfis de rugosidade Barton e Chouby, 1977.

A classificação da rugosidade, ilustrada na Figura 2.9, é dividida em três graus (em patamar ou degraus, ondulada e planar) e sobreposta à rugosidade de pequena escala, está também dividida em três graus (rugosa, lisa e espelhada), resultando por combinação nove classes.

No ano de 1977, Barton propôs a sua correlação com o coeficiente relativo à rugosidade das paredes das discontinuidades, parâmetro JRC, que permite estimar a resistência de pico duma discontinuidade em relação ao deslizamento (Figura 2.10). O método apresentado na Figura 2.10 é um método alternativo que permite determinar o valor aproximado de JRC, referente a tamanhos de blocos *in situ*, através do comprimento e a amplitude máxima do perfil.

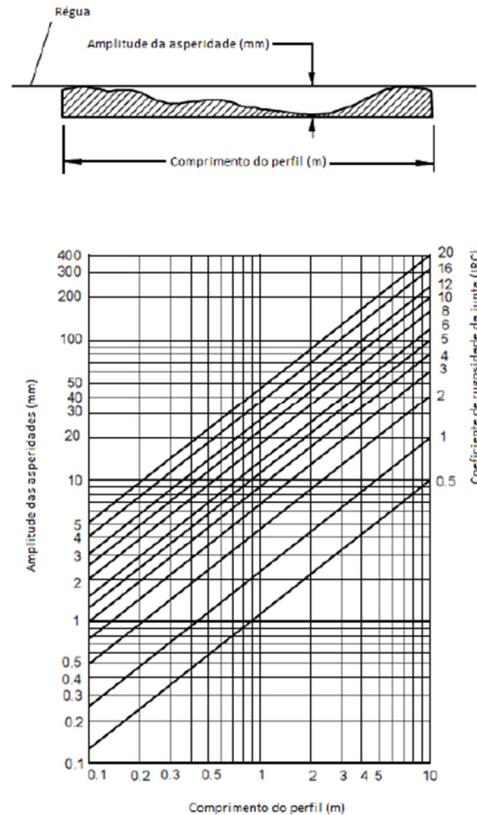


Figura 2.10 - Método alternativo para estimar o JRC (Barton, 1982).

### 2.2.1.2 Resistência da parede

A resistência à compressão da parede de uma descontinuidade é um componente importante da resistência ao cisalhamento e da deformabilidade. Em razão da sua resistência, a rugosidade da descontinuidade pode ser destruída sob ação das tensões cisalhantes e tensões normais.

Os maciços rochosos são frequentemente intemperizados próximos à superfície; desta forma, o intemperismo também pode atuar sobre as paredes das descontinuidades, ocasionando desagregação mecânica e/ou decomposição química do material.

O intemperismo físico provoca a abertura das descontinuidades, a formação de novas descontinuidades através do fraturamento da rocha, a abertura de contornos dos grãos e a fratura ou clivagem de grãos minerais individuais. O intemperismo químico, que gera a descoloração da parede de rocha, provoca a decomposição de minerais em minerais argílicos de baixa resistência ao cisalhamento e de propriedades expansivas.

A resistência da parede da descontinuidade pode ser determinada por meio de exames visuais, descritos qualitativamente, conforme classificação da ISRM (1981), ou através de testes com martelo Schmidt, que estima quantitativamente a resistência da parede a ser empregada nos cálculos da resistência ao cisalhamento segundo o critério de Barton (1974). O grau de intemperismo do material pode ser classificado segundo as tabelas sugeridas pela ISRM (1981).

### 2.2.1.3 Abertura da Fratura

O termo “abertura” é definido como a distância perpendicular de separação entre as paredes de rocha de uma descontinuidade aberta, sendo esse espaço preenchido por ar, água ou materiais diversos. Preenchimento é o termo usado para descrever o material que ocupa o espaço entre as paredes da descontinuidade e que poderá ser muito diversificado, como por exemplo: calcita, quartzo, argila, silte, milonito, brecha etc. (Figura 2.11), e que a abertura das descontinuidades varia em função das diferentes zonas do maciço.

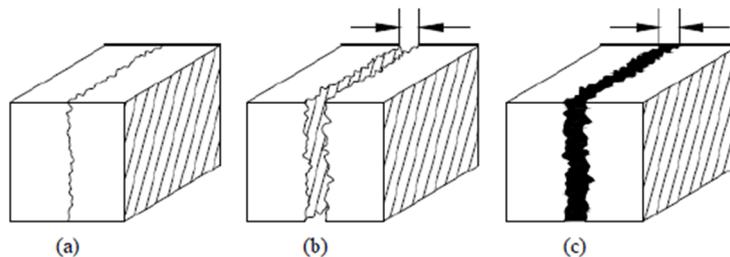


Figura 2.11 - Representação esquemática: a) descontinuidade fechada; b) descontinuidade aberta; c) descontinuidade preenchida (adaptado de ISRM, 1978).

Naturalmente que a abertura das descontinuidades varia bastante ao longo da sua extensão, devido a maior facilidade de acesso à água e, conseqüentemente, facilidade de intemperização e redução da resistência, o que dificulta, ou mesmo impossibilita, a sua medida. Assim, em função do valor da abertura podem classificar-se as descontinuidades de acordo com as designações apresentadas na tabela 1.

A abertura e a sua variação têm influência na resistência ao deslizamento já que a uma maior abertura corresponde uma diminuição de contatos entre as paredes da descontinuidade, podendo daí resultar concentrações de tensões conduzindo a esmagamentos pontuais das rugosidades das paredes da descontinuidade.

Tabela 1 - Descrição da abertura (adaptado de ISRM, 1978).

Designação	Abertura (mm)
Muito fechadas	<0,10
Fechadas	0,10 – 0,25
Parcialmente fechadas	0,25 – 0,50
Abertas	0,50 – 2,50
Largas	>10
Muito largas	10 – 100
Extremamente largas	100 – 1000
Cavernosas	>1000

O tipo de preenchimento e a abertura das descontinuidades fazem-se sentir de modo notável em todos os parâmetros geotécnicos de um maciço: resistência, deformabilidade e permeabilidade.

#### 2.2.1.4 Preenchimento

É chamado material de preenchimento todo aquele que ocupa a distância entre as paredes de rocha de uma descontinuidade, ou seja, a largura da descontinuidade. Dentre os materiais de preenchimento mais comuns, destacam-se: óxido de ferro, calcita, clorita, areias, argilas e siltes.

Em razão da enorme variedade de ocorrência, as descontinuidades preenchidas apresentam grande variação de comportamento, especialmente no que se refere à resistência ao cisalhamento, à deformabilidade e à permeabilidade. Na Figura 2.12 são apresentados alguns exemplos de sistemas complexos de descontinuidades com material de preenchimento.



Figura 2.12 – Esquemas de descontinuidades preenchidas (ISRM, 1981).

Os fatores condicionantes do comportamento de descontinuidades preenchidas mais importantes são:

- Mineralógica do material de preenchimento.
- Distribuição granulométrica do material de preenchimento.
- Teor de umidade e permeabilidade do material de preenchimento.
- Deslizamento cisalhante prévio.
- Rugosidade da parede.
- Largura do material de preenchimento.
- Estado de fraturamento ou esmigalhamento da parede da descontinuidade.

Na Figura 2.13 são ilustradas a amplitude da rugosidade da parede e a espessura do material de preenchimento. No caso de descontinuidades mais simples preenchidas, estes dois parâmetros podem auxiliar na indicação da quantidade de deslizamento cisalhante requerida para a ocorrência de contato rocha/rocha das paredes da descontinuidade.

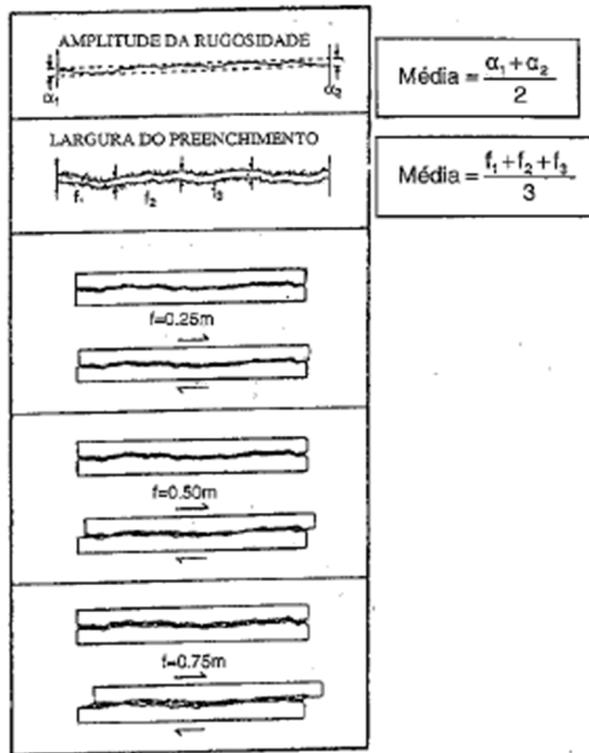


Figura 2.13 – Amplitude da rugosidade da parede e espessura do material de preenchimento de descontinuidade (ISRM, 1981).

### 2.2.2 Cisalhamento cíclico

Em muitos casos, a ruptura do talude ou das encostas rochosas é controlada pelas condições de carregamento, esses carregamentos podem ser divididos em dois tipos principais: monotônico e cíclico (Fathi *et al.* 2016).

Um cisalhamento cíclico refere-se à condição na qual o deslocamento de cisalhamento muda repetidamente entre os deslocamentos máximos positivos e negativos (ou seja, um período de cisalhamento) ao longo de cada ciclo de operação. Um típico teste de cisalhamento cíclico juntamente com a mudança no deslocamento de cisalhamento durante o tempo decorrido é mostrado na Figura 2.14.

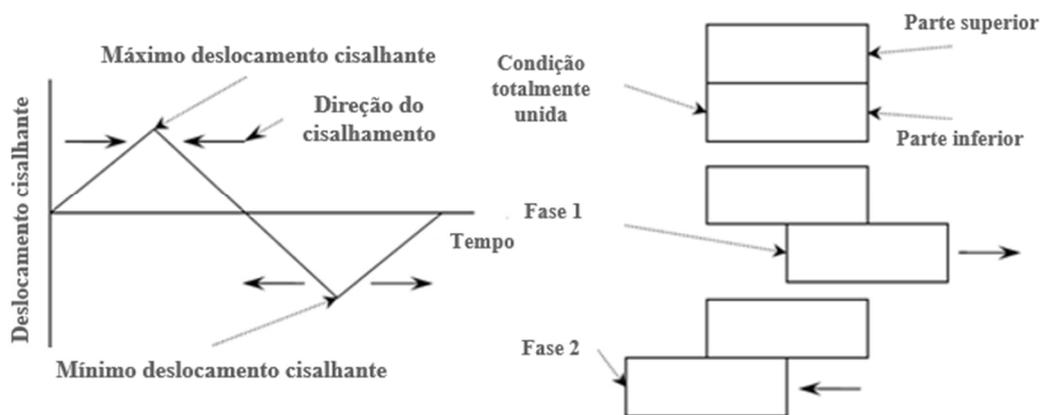


Figura 2.14 - Modelo esquemático do ensaio de cisalhamento cíclico (Indraratna *et al.* 2012).

Como mostrado na Figura 2.14, em um teste cíclico com o controle de deslocamento cisalhante, uma das partes da caixa se move de sua posição inicial para um deslocamento de cisalhamento positivo máximo (Fase 1), seguido de uma inversão da direção de cisalhamento na qual a amostra atinge um deslocamento máximo de cisalhamento negativo na direção oposta (Fase 2), retornando à condição inicial em um ciclo completo (Indraratna *et al.* 2012).

É importante ressaltar que o ensaio de cisalhamento direto simula duas condições principais de tensão que ocorrem na natureza e sob as quais a força de cisalhamento das discontinuidades pode ser determinada, são elas: carga normal constante (CNL) e rigidez normal constante (CNS) (Figura 2.15).

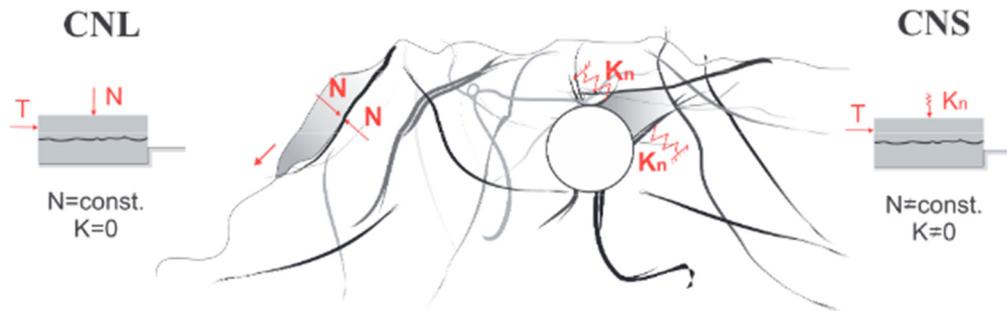


Figura 2.15 - Princípio do procedimento experimental de carga normal constante e rigidez normal constante (Poturovic *et al.* 2015).

Sob condições de carga normal constante, a força normal ou tensão normal durante o processo de cisalhamento age relativamente constante na junta da rocha.

Na natureza, esta condição de contorno experimental é apropriada para uma classe de problemas de engenharia envolvendo o deslizamento de blocos de rocha perto da superfície do solo (por exemplo, estabilidade de talude e estabilidade da escavação da superfície) permitindo que os blocos se movam no plano de cisalhamento, bem como se dilatam livremente. A força normal na junta não se altera durante o movimento de cisalhamento. Este fato é considerado experimentalmente como uma das condições de contorno (Figura 2.15). Primeiramente, este procedimento de teste visa examinar a resistência ao cisalhamento em certa tensão normal sob certas condições de contorno. Não se concentra na investigação da rigidez da junta ou maciço rochoso (Muralha *et al.* 2013, Poturovic *et al.* 2015). Os testes de cisalhamento sob carga normal constante (CNL) não testa realmente a resistência da junta, mas a resistência ao cisalhamento a uma certa carga normal, que pode ser apropriada para fins de projetos sob certas condições de contorno (Muralha *et al.* 2013).

O cisalhamento sob condições de contorno de carga normal constante é adequado para situações: (1) juntas planares, onde não ocorre dilatação durante o processo de cisalhamento, (2) talude de rocha não planar e não reforçado onde as rochas circundantes permitem livremente que as juntas cisalhem sem restringir a dilatação, mantendo constante a carga normal durante o processo de cisalhamento.

Ao contrário dos procedimentos de teste controlados pela carga normal constante, a tensão normal varia sob as condições de rigidez normal constante em resposta à dilatação durante o processo de cisalhamento. Além disso, a tensão normal não é controlada durante o procedimento de teste de rigidez normal

constante. Nesse caso, a capacidade de dilatação é total ou parcialmente restrita. Como resultado, a tensão normal no plano de cisalhamento aumenta com a restrição de dilatação. Este aumento é acompanhado por um aumento na resistência ao cisalhamento (Indraratna & Haque, 2000). Esse fenômeno ocorre em diferentes situações: por exemplo, durante trabalhos subterrâneos, em que um bloco potencialmente instável é limitado pela rigidez dos blocos adjacentes (Figura 2.15). A condição inicial experimental neste procedimento de teste é a rigidez que é predeterminada por confinamento normal à junta da rocha e que é mantida constante durante o processo de cisalhamento (Poturovic *et al.* 2015).

Por causa dos processos naturais envolvidos em sua criação, as descontinuidades presentes nos maciços rochosos são inerentemente rugosas e o contato frequentemente ocorre em uma porção relativamente grande da superfície de contato disponível. Essa rugosidade e o contato inicial imediato com suas superfícies dão origem ao fenômeno da dilatação; uma tendência de dois corpos em contato se separarem durante o movimento tangencial relativo devido ao deslizamento de superfícies rugosas de um corpo sobre o outro. Quando este aumento no volume da superfície de contato é restrito ou parcialmente restrito, como é o caso de qualquer maciço rochoso, o fenômeno da dilatação se manifesta através do aumento das tensões compressivas normais que, por sua vez, podem aumentar substancialmente a resistência da descontinuidade ao deslizamento adicional. Assim, a dilatação pode servir como um importante efeito estabilizador. No entanto, as superfícies rugosas que são responsáveis pela dilatação têm resistência finita e, dependendo da severidade da tensão e da quantidade de deslizamento, irão degradar e afetar uma mudança no comportamento de descontinuidade subsequente (Plesha, 1987).

O dano na junta é ainda mais pronunciada se o carregamento cíclico, que pode ser causado por pequenos tremores repetitivos, é exercido na rugosidade das fraturas sob condições de rigidez normal constante. As condições de carregamento cíclico podem causar a ruptura de descontinuidades em fortes terremotos ou fortes tremores, que são regidos pelas rugosidades de primeira ordem (possuem ângulos mais reduzidos devido à maior escala de medida) e carregamentos cíclicos também podem causar algumas degradações e fadiga no comportamento pré-pico das fraturas em terremotos fracos ou fracos tremores. Segundo Jafari *et al.* (2003), o comportamento das juntas pode mudar como resultado das variações em

rugosidades de segunda ordem (mostram valores elevados do ângulo, em razão da menor escala de medida) devido ao pequeno carregamento cíclico.

Além dos controles de tensão normal nos ensaios de cisalhamento, o comportamento do cisalhamento das juntas rochosas pode ser estudado sob duas condições de controle de cisalhamento: controle de deslocamento cisalhante e controle de tensão cisalhante.

Para ensaios de cisalhamento monotônico, a condição de controle de deslocamento cisalhante é a mais comum. O ensaio com controle de deslocamento ocorre quando o deslocamento que é imposto no corpo de prova é a variável controlada, e neste caso a variável medida é a resistência do material.

O ensaio com controle de tensão ocorre quando é imposta uma tensão cisalhante constante na amostra e a variável a ser verificada é o deslocamento. Esse ensaio leva em consideração o efeito dos parâmetros da junta na previsão do comportamento do cisalhamento.

### **2.2.3 Cisalhamento cíclico com controle de deslocamento e avaliação da degradação da rugosidade**

Grande parte das pesquisas sobre os testes de carregamento cíclico foi focada na determinação da relação tensão-deslocamento e tensão de pico (Jafari *et al.* 2003). Diversos pesquisadores relataram que a resistência ao cisalhamento é função da rugosidade da junta, número de ciclos e tensão normal.

Plesha (1987) estudou o comportamento de cisalhamento cíclico de juntas de rochas, considerando uma lei exponencial para a degradação da rugosidade, incorporando a taxa de dilatação. Hutson e Dowding (1990) realizaram testes laboratoriais de cisalhamento cíclico em rocha granítica e calcária e verificaram ainda a forma exponencial representando o decaimento da taxa de dilatação. Lee *et al.* (2001) estenderam o modelo original de Plesha através de deslocamentos de cisalhamento cíclico em rocha granítica e mármore para estudar em detalhes a degradação da rugosidade e a implicação no comportamento de cisalhamento da descontinuidade. A topografia da superfície da fratura foi escaneada (perfilômetro a laser) para caracterizar as irregularidades usando um sistema 3D e uma série de testes de cisalhamento cíclico a uma taxa de deslocamento de 0,05-0,08 mm/s para manter as condições de carregamento pseudo-estáticas de cisalhamento. Em cada teste, a tensão normal constante, variando de 0,2-5 MPa, foi aplicada e um total de

52 amostras (28 granitos e 24 de mármore) foram testadas. O número de ciclos de carregamento de cisalhamento foi variado de 2 a 16 com o deslocamento máximo de cisalhamento de 715 mm.

Puntel *et al.* (2006) desenvolveram um modelo matemático para descontinuidades baseado na mecânica de fratura (Cervenka *et al.* 1998), sendo extensivamente modificado para levar em consideração o carregamento cíclico e a degradação da superfície acompanhando de uma maneira similar à proposta por Plesha *et al.* (1987).

Mirzaghobanali *et al.* (2014) estudaram as variações da resistência ao cisalhamento de rochas sintéticas feitas de gesso de alta resistência (60 MPa) sob condições de carregamento cíclico e rigidez normal constante. Os autores realizaram nove testes de cisalhamento cíclico com taxas de cisalhamento de 0,5 mm/min e tensões normais iniciais de 0,56, 1,64 e 2,4 MPa. Os testes sob baixa taxa de cisalhamento (0,56 MPa) foram continuados por quatro ciclos de cisalhamento, enquanto os outros testes foram continuados por 100 ciclos de carregamento consecutivos. O deslocamento tangencial máximo foi metade do comprimento da rugosidade (15 mm). Os autores concluíram que à medida que a tensão normal inicial foi aumentando, o mecanismo de cisalhamento foi dominado pela quebra de rugosidade e a resistência ao cisalhamento diminuiu com o aumento dos ciclos de carregamento.

Shrivastava e Rao (2015) estudaram o efeito da rugosidade da junta e das condições de contorno CNL e CNS de rochas sintéticas (gesso) no comportamento ao cisalhamento. Os autores selecionaram uma taxa de 0,50 mm/min de deslocamento cisalhante, que é baseado no estudo realizado por Shrivastava (2012) sobre tipos similares de juntas de rochas sintéticas, em que se concluiu que não há efeito da taxa de deslocamento cisalhante sobre tensão de cisalhamento de pico até uma taxa de 0,5 mm/min, e a uma taxa de cisalhamento superior a 0,5 mm/min, o efeito é aumentar a tensão de pico de cisalhamento para ambas as condições de contorno.

Niktabar *et al.* (2017) avaliaram o comportamento do cisalhamento cíclico em rocha sintética (gesso) fraturada com rugosidades regulares variando de 15° a 30°. O teste de cisalhamento foi realizado mantendo a frequência (0,01 Hz) e a amplitude do deslocamento de cisalhamento ( $\pm 8$  mm) sob condições cíclicas constantes com diferentes valores normais de tensão (0,1 MPa; 0,5 MPa; 1 MPa)

para um total de 30 ciclos. A resistência ao cisalhamento das juntas de rocha aumentou com o aumento do ângulo de rugosidade e da carga normal durante o primeiro ciclo de cisalhamento. Com o aumento do número de ciclos de cisalhamento, a resistência ao cisalhamento diminuiu para todos os ângulos da rugosidade, mas a taxa de redução foi maior no caso de altos ângulos. Os resultados dos testes indicaram que tensão cisalhante das juntas irregulares foi maior do que a das juntas regulares em diferentes ciclos de cisalhamento em baixa tensão normal (0,1 MPa).

Wen-Chen *et al.* (2018) realizaram ensaios de cisalhamento cíclico em rocha granítica sob condições de carga normal constante para avaliar o comportamento da resistência, o comportamento do deslocamento normal das fraturas e a degradação da superfície da fratura. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados sob cargas normais constantes de 1, 2 e 3 MPa, e as cargas de cisalhamento foram impostas à amostra com uma taxa de deslocamento de 0,9 mm/min. Os resultados mostraram que a degradação da superfície ocorre principalmente no primeiro ciclo de cisalhamento e as cargas normais constantes impostas às juntas têm efeitos na elevação da degradação da morfologia. Durante os testes de cisalhamento cíclico, as superfícies das juntas evoluem do estado áspero para o estado liso, mas mantêm uma ondulação geral.

Han *et al.* (2019) investigaram as variações nos comportamentos mecânicos de juntas de rochas sintéticas (gesso) irregulares durante o cisalhamento sob condições de carregamento cíclico e rigidez normal constante. Os autores avaliaram a influência da tensão normal inicial, rigidez normal e velocidade de cisalhamento nos comportamentos de cisalhamento. Os resultados mostram que a tensão de cisalhamento, tensão normal e deslocamento normal para juntas não preenchidas e preenchidas diminuem com o aumento do número de ciclos, especialmente na faixa de número de ciclos de 1– 2. Isso ocorre porque algumas rugosidades na superfície da junta são cisalhadas durante o primeiro processo de cisalhamento, e os testes de cisalhamento subsequentes para número de ciclos maior que dois foram submetidos ao processo de cisalhamento cíclico. A tensão normal inicial e a rigidez normal contribuem significativamente para as variações no comportamento de cisalhamento das descontinuidades.

A maioria dos casos relatados acima abordou o efeito das condições de carregamento cíclico na previsão de parâmetros de resistência ao cisalhamento e no mecanismo de cisalhamento de juntas de rocha.

#### 2.2.4 Cisalhamento cíclico com controle de tensão

Poucos estudos sistemáticos estão disponíveis sobre os efeitos de pequenos terremotos repetitivos ou perturbações na resistência ao cisalhamento das descontinuidades rochosas. Segundo Fathi (2006), o cisalhamento cíclico e os deslocamentos normais, bem como as degradações por fadiga no estágio pré-pico de cisalhamento são muito pequenos e, conseqüentemente, as alterações são de difícil medição.

Alguns pesquisadores como Jafari *et al.* (2003), Jafari *et al.* (2004), Fathi (2006), Liu *et al.* (2018) e Kou *et al.* (2019) estudaram parâmetros de resistência ao cisalhamento de descontinuidades que foram afetados por condições de carregamento cíclico pré-pico. As relações entre o pico de resistência ao cisalhamento de juntas de rocha e o número de ciclos, ordens de rugosidade das juntas, taxa de carregamento de cisalhamento cíclico e amplitudes raramente são estudadas nos testes de carregamento cíclico pré-pico.

Jafari *et al.* (2003) investigaram o efeito das taxas de deslocamento, do número de ciclos e das amplitudes das tensões dos ciclos de carregamento pré-pico (carga controlada), no pico e na resistência ao cisalhamento residual das juntas de rochas sintéticas feitas com argamassa em ensaios triaxiais. Os autores verificaram que a resistência ao cisalhamento das descontinuidades está relacionada à taxa de deslocamento (velocidade de cisalhamento), que variou de 0,05 a 0,4 mm/s, ao número de ciclos de carregamento, em que a degradação da rugosidade ocorreu principalmente durante os primeiros ciclos de cisalhamento, sendo atenuada ao longo dos ciclos, e à amplitude de tensão (1,7 MPa, metade da tensão máxima medida em carregamento monotônico de 3,4 MPa). As tensões normais variaram de 1,2, 4,2 e 6,5 MPa. No ensaio cíclico triaxial, os autores usaram uma taxa de 1 Hz, tensão cisalhante de 1,7 MPa e tensão confinante de 4 MPa durante 100 ciclos. Os autores verificaram que a resistência ao cisalhamento das juntas está relacionada à taxa de deslocamento (velocidade de cisalhamento), número de ciclos de carregamento e a amplitude de tensão.

Jafari *et al.* (2004) investigaram os efeitos de pequenos terremotos repetitivos no comportamento de réplicas de descontinuidades a base de argamassa sob carregamento monotônico e cíclico no modo controle de tensão e controle de deslocamento. Os autores testaram mais de 30 réplicas usando um equipamento de compressão triaxial sob diferentes condições de tensões. O número de ciclos, frequência e amplitude de tensão nas resistências de cisalhamento de pico e residual foram analisados. A frequência variou entre 0,2 e 1 Hertz sob tensão de confinamento de 4 MPa. Os ciclos variaram em 25, 50, 100, 300, 500, 1000 e 3000 e tensão cisalhante aplicada foi de 1,7 MPa para os ensaios cíclicos (metade da tensão máxima nos ensaios monotônicos). Os autores concluíram que entre 50 a 1000 ciclos de cisalhamento com amplitude de 50% da tensão de pico podem reduzir a força de cisalhamento da descontinuidade em 5 a 15%. Quando a velocidade de cisalhamento aumenta no carregamento monotônico a resistência ao cisalhamento diminui. Após 500 ciclos de cisalhamento a resistência ao cisalhamento permanece quase constante e o aumento da frequência no estágio de controle de tensão pode reduzir a força de cisalhamento da descontinuidade em 3 a 10% para cada 100 ciclos.

Fathi *et al.* (2016) estudaram o mecanismo de cisalhamento em amostras de réplicas de juntas preparadas com argamassa. Os autores realizaram sob as condições de carregamento cíclico pré-pico doze testes em duas etapas consecutivas. Primeiro, controlado por tensão e depois controlado por deslocamento. Na etapa de controle de tensão, foram aplicados ciclos de carregamento com frequência de 0,2 Hz e amplitude de 30% (0,25 MPa) e 50% (0,42 MPa) da tensão máxima de cisalhamento monotônico (0,84 MPa) sob tensão normal de 0,8 MPa. Os testes de cisalhamento de carregamento cíclico pré-pico (controlado por carregamento) foram realizados em diferentes números de ciclos (5, 10, 20, 100, 500 e 1000). Os autores, a fim de identificar mudanças na morfologia das rugosidades, escanearam as juntas antes e após os testes de cisalhamento. Os autores concluíram que o efeito do carregamento cíclico pré-pico no mecanismo de cisalhamento das descontinuidades pode ser categorizado em duas classes: contração e degradação. Eles também observaram que aumentar ou diminuir o número de ciclos durante o carregamento cíclico de pré-pico não tem um efeito significativo nos parâmetros de resistência ao cisalhamento residual. A

tensão de cisalhamento de pico aumentou sob baixo número de ciclos e sob maior número de ciclos diminuiu devido à degradação da superfície da descontinuidade.

Liu *et al.* (2018) realizaram testes de cisalhamento monotônico para determinar a resistência ao cisalhamento em amostras de arenito fraturado com diferentes tipos de rugosidade e cisalhamento cíclico de pré-pico para investigar o dano por fadiga a uma tensão normal constante. No teste de cisalhamento monotônico, a tensão normal e a taxa de deslocamento são adotadas como 4 MPa e 0,5 mm/min, respectivamente. O nível de tensão normal selecionado neste estudo é semelhante ao nível de tensão confinante normalmente encontrado em escavações subterrâneas em profundidades inferiores a 300 m. Além disso, os números de ciclos são considerados 20, 50, 100, 200 e 500 vezes. Na etapa de carregamento cíclico, as taxas de carregamento 0,5 kN/s, 1,0 kN/s e 1,5 kN/s são adotados para atingir as condições de carregamento cíclico. As tensões de cisalhamento cíclico máximas são adotadas como amplitudes de 50% e 80% da resistência ao cisalhamento monotônico máxima das amostras de rochas, e o carregamento de cisalhamento cíclico mínimo é tomada como 0,56 MPa, aplicando uma taxa de 0,5 mm/min, sendo o deslocamento máximo de cisalhamento definido como 10 mm. Os autores concluíram que o dano por fadiga ocorre nas rugosidades de segunda ordem em ambos os blocos dentro de um baixo número de ciclos, mas as fissuras de fadiga iniciadas com alto ângulo de iniciação em relação às rugosidades de primeira ordem em ambos os blocos se unem entre si dentro do alto número de ciclos.

Kou *et al.* (2019) analisaram a resposta mecânica de juntas rochosas de arenito com rugosidades triangulares produzidas no laboratório, quando submetidas à carregamento de cisalhamento cíclico pré-pico e carregamento normal constante de 1, 2 e 4 MPa. Três testes de cisalhamento direto com diferentes ângulos iniciais de rugosidade primária, isto é, 15 °, 30 ° e 45 °, e o mesmo ângulo de rugosidade inicial subordinado de 45° foram primeiro conduzidos. Posteriormente, testes de cisalhamento cíclico foram conduzidos usando duas etapas de controle de cisalhamento: carregamento controlado por tensão cisalhante e carregamento controlado por deslocamento cisalhante. A frequência do carregamento cíclico adotada é de 0,2 Hz, com base nos estudos anteriores de terremotos fracos por Fathi *et al.* (2016). Segundo Kou *et al.* (2019), quando a amplitude da tensão cisalhante equivale a 50% do pico da tensão de resistência monotônica, a resistência de pico

aumenta à medida que o número de ciclos aumenta dentro de um baixo número de ciclos. No entanto, dentro de um número grande de ciclos, a resistência ao cisalhamento de pico diminui com um número crescente de ciclos.

Tabela 2 – Resumo dos parâmetros utilizados em cada estudo sob condições de controle de tensão.

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Rocha</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Freq. (Hz)</b>	<b>Tensão normal (MPa)</b>	<b>Tensão cisalhante (MPa)</b>
Jafari <i>et al.</i>	2003	Sintética	Triaxial	1	1,2 – 6,5	1,7 (50 %)*
Jafari <i>et al.</i>	2004	Sintética	Triaxial	0,2 – 1	5,9	1,7 (50 %)*
Fathi <i>et al.</i>	2016	Sintética	Cisalhamento direto	0,2	0,8	0,25 (30 %)* e 0,42 (50%)*
Liu <i>et al.</i>	2018	Arenito	Cisalhamento direto	0,2	4	0,56 – 2,5
Kou <i>et al.</i>	2019	Arenito	Cisalhamento direto	0,2	1 - 4	0,56 – 2,5

\*Corresponde à porcentagem da tensão máxima do cisalhamento monotônico.

Embora os estudos acima mencionados tenham fornecido algumas informações sobre os parâmetros de resistência ao cisalhamento de juntas de rocha sintéticas sob condições de carregamento cíclico pré-pico usando os dados mencionados na Tabela 2, os autores não estavam interessados em problemas relacionados na superfície, devido à alta tensão normal usada nos ensaios, e problemas de estabilidade relacionados com frequências menores que 0,2 Hz (0,1 Hz), tensões normais mais baixas, na ordem de 100 kPa, e rochas com fraturas naturais são pouco compreendidas e raramente estudadas. As relações entre baixas tensões normais, tensões cisalhantes de pré-pico e baixas frequências associadas ao deslocamento acumulado de blocos ao longo do tempo possuem alta relevância para o entendimento de quedas de rochas em superfície. Tensões normais baixas estão relacionadas a problemas de estabilidade de taludes rochosos em superfície.

### 2.2.5 Permeabilidade

Em maciços rochosos fraturados com rochas pouco permeáveis, as fraturas fornecem caminhos preferenciais para a passagem de fluidos e compreender como as características do fluxo dentro da fratura evoluem com o espaço e o tempo é um desafio para muitas aplicações práticas na segurança e estabilidade de maciços rochosos.

O fluxo de fluidos em fraturas é significativamente dependente da geometria dos espaços vazios (abertura) entre duas paredes de fraturas. A abertura da fratura varia de acordo com as condições de carregamento mecânico (Li e Sun, 2019), indicando que as características do fluxo estão relacionadas com o comportamento mecânico das fraturas (Liu *et al.* 2020). Segundo Esaki *et al.* (1999), as juntas são deformadas por fechamento, dilatação e cisalhamento. A tensão normal e a tensão de cisalhamento atuando numa junta pode fechar ou abrir a fratura devido à contração ou dilatação.

A lei de fluxo radial assume que as superfícies das juntas são lisas e paralelas, o estado do fluxo do fluido é laminar e se distribui de maneira axissimétrica e pode ser descrito da seguinte forma (Zhang e Nemcik, 2013):

$$Q = \frac{2\pi g}{12\nu \ln\left(\frac{r_i}{r_o}\right)} \cdot \Delta h \cdot eh^3 \quad (eq. 2.1)$$

Onde Q é a vazão na fratura, g é a aceleração da gravidade,  $\nu$  é a viscosidade do fluido (água),  $r_o$  é o raio de entrada de água,  $r_i$  é o raio externo da superfície da fratura,  $\Delta h$  é a diferença de pressão de entrada e saída de água e  $eh$  é a abertura hidráulica.

Segundo Cao *et al.* (2019), a lei de fluxo radial mostra que a vazão é linear com a pressão hidráulica e ao cubo com a abertura. Conforme mostrado na Figura 2.16 (a), a lei de fluxo radial assume que as superfícies da junta são lisas e paralelas e o fluxo de fluido obedece à lei de Darcy. No entanto, para a fratura natural (Figura 2.16 (b)) as superfícies da junta são sempre rugosas, as áreas de contato são onipresentes na fratura, os canais de infiltração efetivos são estreitados por ranhuras e material triturado e o caminho do fluxo é geralmente tortuoso.

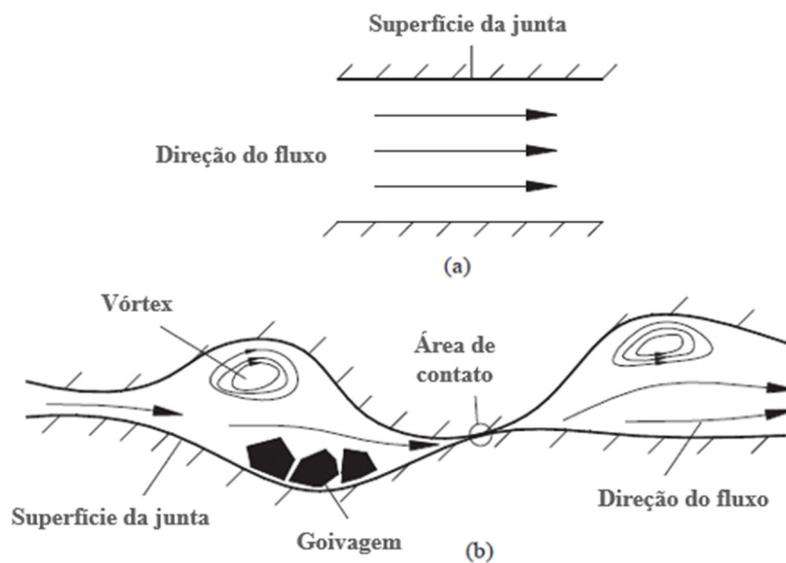


Figura 2.16 - Fluxo de fluido em uma única fratura: (a) superfície da junta lisa e paralela, (b) superfície da junta rugosa natural (Cao *et al.* 2019).

Para relacionar os efeitos mecânicos e hidráulicos em fraturas, a abertura mecânica ( $E_m$ ) e hidráulica ( $e_h$ ) são geralmente consideradas separadamente (Barton *et al.* 1985; Esaki *et al.* 1991; Zimmerman *et al.* 1991; Park *et al.* 2013 Apud Vogler *et al.* 2016). Enquanto a abertura mecânica descreve a distância física entre duas superfícies de fratura, a abertura hidráulica descreve a abertura acomodando um fluxo particular e assumindo um modelo de placa paralela. Com o aumento da abertura mecânica, a abertura hidráulica aumenta, mas a relação entre a abertura mecânica e a abertura hidráulica não é de um para um (Esaki *et al.* 1991, 1999; Rutqvist e Stephansson 2003; Xiong *et al.* 2011 e McClure e Horne 2014 Apud Vogler *et al.* 2016).

Barton *et al.* 1985, propuseram a seguinte relação empírica ligando a abertura hidráulica ( $e_h$ ) e a abertura mecânica ( $E_m$ ), incorporando o JRC (Joint Roughness Coefficient):

$$e_h = \frac{JRC^{2,5}}{(E_m/e_h)^2} \quad \text{ou} \quad e_h = \frac{(E_m)^2}{(JRC)^{2,5}} \quad (\text{eq. 2.2})$$

Esta equação somente é válida para a abertura mecânica ( $E_m$ ) maior que a abertura hidráulica ( $e_h$ ). As unidades de  $e_h$  e  $E_m$  são em microns. Para superfícies

de juntas planas e lisas com  $JRC = 0$  e juntas muito abertas, Barton sugeriu que a abertura hidráulica é igual à abertura mecânica.

Esaki *et al.* (1999) estudaram o efeito da dilatância da junta e a deformação por cisalhamento na condutividade hidráulica. Os autores utilizaram tensões normais que variavam de 1 a 20 MPa e deslocamento controlado a uma taxa de 0,1 mm/s até um deslocamento máximo de 20 mm. Os resultados dos testes indicaram que a alteração da condutividade hidráulica de uma junta é aproximadamente semelhante à de sua dilatância e a condutividade hidráulica torna-se constante com o aumento do deslocamento. O material produzido pelo desgaste da rugosidade durante o cisalhamento pode bloquear parte dos caminhos de fluxo e, conseqüentemente, causará uma diminuição da condutividade hidráulica.

Chen *et al.* (2000) investigaram o comportamento hidráulico de fraturas naturais para sistemas geotérmicos através das relações entre deslocamento da fratura, abertura mecânica e abertura hidráulica sob diferentes condições de tensões. Os resultados deste estudo mostraram que a dilatação de cisalhamento induzida pelo deslocamento cisalhante pode aumentar significativamente a permeabilidade das fraturas, mesmo com tensões normais elevadas. O dano à superfície da fratura é outro fator importante que afeta o comportamento hidráulico das fraturas. As rugosidades da fratura podem ser esmagadas devido a altas tensões normais, deslocamentos cisalhantes e processos repetidos de carregamento e descarregamento. Da mesma forma, o material triturado pode ser produzido durante o deslocamento cisalhante. Esses fenômenos podem causar redução considerável nos canais de fluxo de fluido, o que leva a uma redução na permeabilidade da fratura.

Vogler *et al.* (2016) estudaram a evolução da permeabilidade em fraturas naturais de tração e cisalhamento de granodioritos, em escala de laboratório, submetidas a carregamento cíclico entre 1 e 68 MPa de pressão confinante em sistemas geotérmicos. Superfícies das fraturas foram escaneadas antes e depois do teste para dar uma visão sobre a deformação da superfície durante o teste. O material triturado produzido pelo dano na rugosidade foi coletado para estudar o impacto na transmissividade. Os autores concluíram que com o aumento da pressão confinante ocorreu uma diminuição da transmissividade, assim também ocorreu com as amostras que sofreram deslocamento. A permeabilidade também diminuiu com os ciclos de carregamento em andamento, indicando deformação não elástica

das superfícies das fraturas. As aberturas mecânicas mudam drasticamente para tensões de confinamento baixas. As mudanças mais pronunciadas nas aberturas hidráulicas ocorrem após o fechamento da abertura mecânica inicial. Isso pode ser explicado pelo fechamento da abertura mecânica, causando o deslocamento do fluxo de fluido para canais de fluxo individuais. Este comportamento muda novamente para altas pressões de confinamento, quando a abertura mecânica muda (ou seja, fecha) ainda mais, enquanto a abertura hidráulica não mudar significativamente. Essas mudanças não lineares na relação das mudanças de abertura mecânica e hidráulica podem ser atribuídas ao aumento dos danos à superfície e ao fechamento da fratura para altas pressões de confinamento, enquanto o fluxo de fluido já está confinado ao fluxo do canal e não é fortemente afetado pela compressão da fratura.

Cao *et al.* (2019) investigaram o regime de escoamento em uma única fratura durante o processo de cisalhamento influenciado por alta pressão hidráulica, destruição da superfície da junta, material triturado e regime de anisotropia de escoamento. Os autores concluíram que a precisão da lei de fluxo radial diminuiu drasticamente antes do deslocamento de pico e, em seguida, tendeu a estável resultante da ruptura da amostra. A precisão foi maior com pressões hidráulicas mais baixas. A destruição da superfície das juntas e o material triturado exerceram notável influência na morfologia geométrica da fratura e no regime de fluxo devido os canais de infiltração se tornarem imprevisíveis.

Apesar de os estudos acima mencionados terem fornecido algumas informações sobre comportamento hidráulico de fraturas, rugosidade, material triturado e dilatância, grande parte fala sobre sistemas geotérmicos com altas tensões de confinamento e altas tensões normais, enquanto que o comportamento hidráulico de fraturas com baixas tensões normais associadas a problemas de taludes na superfície são pouco compreendidas. A avaliação do comportamento hidráulico sob tensões normais baixas ao longo de ciclos de cisalhamento pré-pico é importante para se entender o comportamento da permeabilidade, abertura hidráulica e material cominuído gerado pelo desgaste da rugosidade durante os ensaios.

### **3 Materiais e métodos utilizados na avaliação do comportamento mecânico e hidráulico de descontinuidades de rochas gnáissicas**

O presente capítulo apresenta os materiais utilizados e os procedimentos experimentais realizados durante o trabalho, discriminando as normas técnicas seguidas e os equipamentos envolvidos. A metodologia envolveu etapas de caracterização física e mecânica de blocos de rochas gnáissicas coletadas na pedreira Bangu. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente e Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio.

#### **3.1 Materiais**

Para o estudo e a avaliação do comportamento mecânico das fraturas foram utilizados cinco blocos de rocha gnáissica coletados na pedreira Bangu. Essa rocha é encontrada por toda a cidade do Rio de Janeiro e na presença dessas rochas normalmente ocorrem condicionantes geológicas geotécnicas de destaque como rochas alteradas, falhas, diques e zonas fraturadas ocasionando diversos acidentes geológicos.

Durante os trabalhos de campo foram visitados diversos pontos na pedreira, a fim de buscar amostras fraturadas que pudessem ser utilizadas no trabalho (Figura 3.1). A retirada dos blocos foi realizada com o auxílio dos funcionários da pedreira. Foram utilizadas duas retroescavadeiras, uma com concha e uma com rompedor hidráulico acoplado. Após a coleta, os blocos foram transportados por meio de caminhão Munck e acondicionados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, onde foram extraídos os corpos de prova.



Figura 3.1 – Frente de produção da Pedreira Bangu. Local de coleta dos blocos.

### 3.2 Contexto geológico local

O Morro do Sandá, onde está localizada a Pedreira Bangu, está localizado na vertente norte do Maciço da Pedra Branca, em Bangu, no município do Rio de Janeiro. O principal acesso é pela Avenida Brasil, sentido zona oeste, seguindo-se até Bangu. Do centro de Bangu segue-se pela Rua da Usina até o entroncamento com a Rua Maravilha, esquina onde se encontra a entrada da Pedreira Bangu (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Morro do Sandá, Pedreira Bangú e área de exploração. Fonte: Google Earth, acessado em 07.02.2022.

Na cidade do Rio de Janeiro ocorrem regionalmente gnaisses e migmatitos de composições e estruturas variadas, sendo eles subdivididos em duas séries distintas: a Série Inferior, ortognaíssica; e a Série Superior, paragnaíssica (Hembold *et al.*, 1965). O Morro do Sandá, localizado ao norte do Maciço da Pedra Branca, apresenta gnaisses e migmatitos encaixantes situados na Série Inferior, sendo representados por gnaisses de composição granodiorítica, com distintas granulometrias e texturas, fortemente deformados, com dobras muito apertadas e planos de cisalhamento associados, além de aspecto migmatítico.

O mapa geológico detalhado (1:5000) do morro do Sandá (Porto Jr. e Valente, 1988) revela uma zona de bordo de intrusão, com gnaisses dominando sua porção norte, ocorrendo mais restritamente a oeste, sendo cortados por dois granitos principais, com predomínio marcante de um deles, que parece se estender mais amplamente para o lado sul da área. Uma zona de enclaves foi reconhecida na sua porção mais central, próxima ao topo do morro (Figura 3.3).

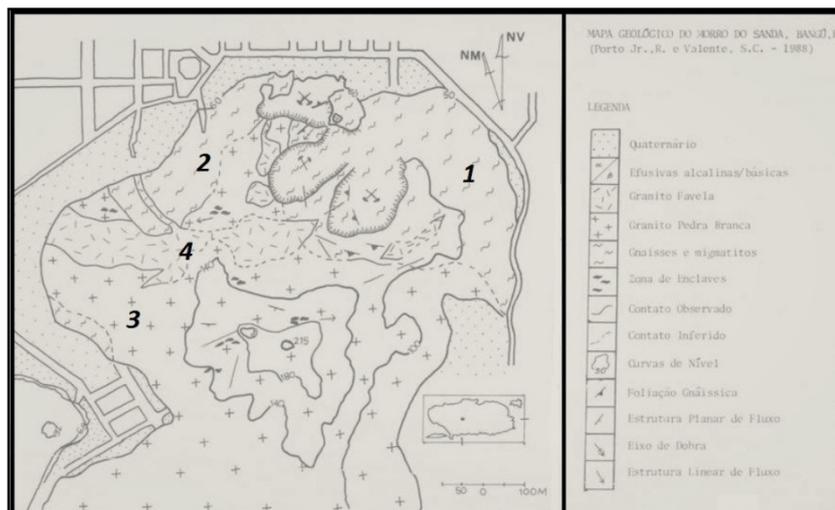


Figura 3.3 – Mapa geológico do Morro do Sandá. 1 – Gnaisses Pré-colisionais (Tonalito Gnaiss); 2 – Gnaiss Sin-colisionais (Granodiorito Gnaiss); 3 – Granito Tardi-colisional (Granito Favela) e 4 – Granito Pós-colisional (Granito Favela). Fonte: Porto Jr., R. e Valente, S. C. 1988.

Porto Jr. e Valente (1988) apontam que, para o Morro do Sandá, as rochas encaixantes são gnaisses fortemente bandados, com granulometria variável de média a fina, geralmente escuros ou acinzentados. Alguns denotam ser ortognaisses, com enclaves de gnaisses anteriores, com ocorrências mais restritas. Já os granitoides presentes, mostram texturas e estruturas diversas, e que podem ser também distintos no campo por outros critérios.

Nas rochas encaixantes, a deformação foi bastante intensa, incluindo dobras muito apertadas com eixos mergulhando em média  $30^\circ$  para sudoeste e planos axiais mais íngremes com a mesma direção de mergulho. Algumas possuem planos de cisalhamento associados. A foliação gnáissica geral é variável, mas sempre com fortes mergulhos, predominando direções NNE-SSO. Cisalhamento dúctil é bastante comum nos gnaisses, com planos associados a superfícies axiais de dobras apertadas, ou sem relação direta com eles, estes últimos geralmente N-S, com mergulhos em média de  $40^\circ$  para oeste.

### 3.2.1 Identificação da área de coleta

A pedreira Bangú apresenta rochas granitoides, gnáissicas e migmatíticas, além de diques de basalto e rochas alcalinas. Na pedreira Bangu é possível encontrar afloramentos de rocha sã, medianamente alterada e poucos afloramentos de rochas alteradas, que estão associadas a padrões de fraturamentos e alterações do tipo hidrotermal e intempéricas.

A fase de identificação da área para coleta das amostras foi realizada com base num mapeamento preliminar dos afloramentos e estruturas que ocorrem por toda a pedreira. As rochas gnáissicas compõem a quase totalidade dos afloramentos examinados, bem como a frente da pedreira na qual foram retiradas as amostras deste estudo. A Figura 3.4 mostra um maciço alterado em pequena proporção na parte superior (linha preta) e o meio e a base não apresentam alterações significativas. Frequentemente se observa veios aplíticos dobrados e disseminados, cortando a rocha gnáissica que possui um bandamento gnáissico bem definido. Essa intensa quantidade de estruturas interdigitadas e, por vezes, preenchendo prováveis fraturas remete a possibilidade de intensa atividade hidrotermal.

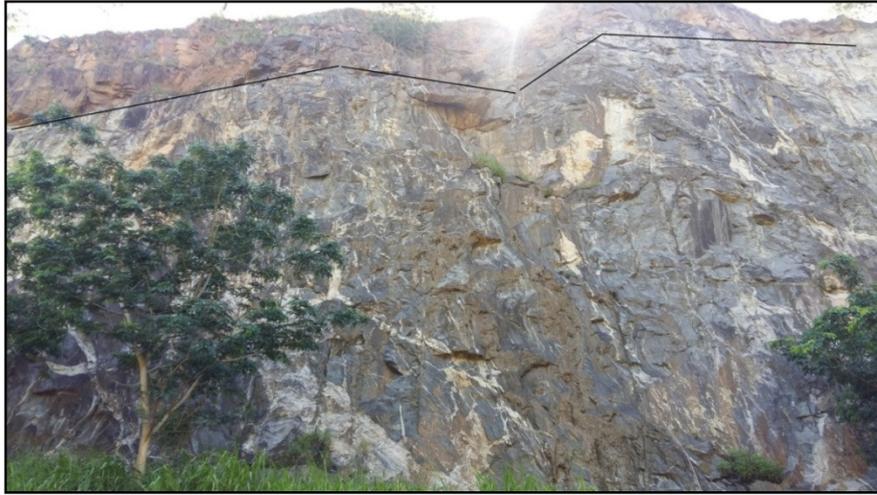


Figura 3.4 – Frente da pedreira que não foi lavrada. Na parte superior do maciço ocorrem rochas alteradas com coloração marrom amarelada, fruto de processos intempéricos. Observar a linha marcando aproximadamente o contato da rocha sã com a medianamente alterada.

Próximo a esse maciço pode-se notar rochas levemente alteradas com duas famílias de fraturas subverticais e foliação mergulhando para dentro do maciço, favorecendo a queda de blocos em forma piramidal (Figura 3.5a).

A Figura 3.5b mostra a ocorrência de veios basálticos falhados e dobrados (drag folds) associados a zonas de deformação dúctil/rúptil, além de marcadores cinemáticos indicando a direção do movimento dessa zona de cisalhamento.

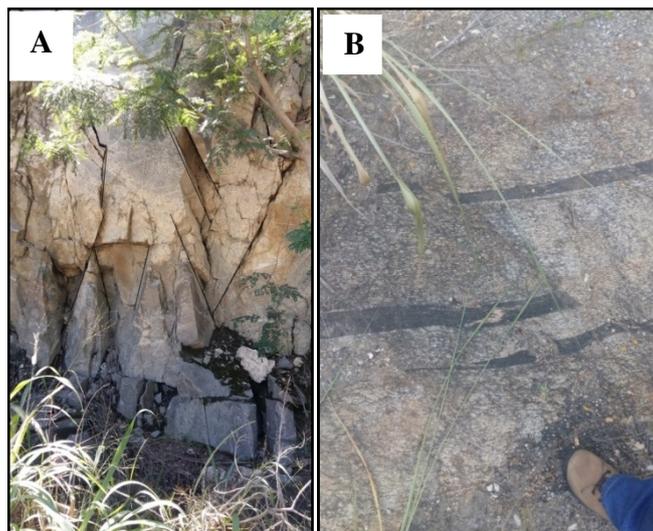


Figura 3.5 – (A) Rocha levemente alterada com fraturas interconectadas. (B) marcadores cinemáticos e falhas com dobras associadas (drag folds) indicando deformação rúptil/dúctil.

Em uma das frentes da pedreira foi observado a ocorrência de um gnaiss pouco alterado por ação do intemperismo e na base (local onde está se lavrando o material) a rocha apresentava-se sã com provável foco de alteração hidrotermal provocado pela intensa deformação e quantidade de fraturas preenchidas por diques básicos e alcalinos.

Além disso, observa-se uma sequência mista de rochas gnaissico-migmatíticas que são cortadas por diques de basalto, fonolito, traquito e pegmatito de composição ácida ou granítica. Esses diques intrusionam os gnaisses encaixantes discordantemente à foliação, com espessura de 2,5 metros e frequentemente a rocha encaixante gnáissica apresenta-se cortada por veios aplíticos e pegmatíticos dobrados e disseminados, com ocorrência de inúmeras fraturas conectadas com direções N/NE - N/NW e inúmeros contatos litológicos (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Frente da pedreira – Local do ponto de coleta das amostras. Observar os planos de fraturas de direções N/NE - N/NW favorecendo o processo de alteração do maciço.

O método de amostragem envolveu a escolha de um afloramento, que possui uma zona de contato entre um dique de fonolito e um ortognaiss, com sinais de interação entre o dique e a rocha encaixante. Para isto, subdividimos os pontos de coleta de modo a ter um conjunto de amostras fraturadas com e sem preenchimento (Figura 3.7).

No ponto estudado, o dique de fonolito tem direção NW-SE com mergulho subvertical para SW, espessura de 2,5 metros. O contato dique e rocha encaixante são bruscos e o dique intrusiona o ortognaiss encaixante discordantemente à

foliação e, por vezes, encontra-se partes de fonolito preenchendo as bordas do ortognaisse devido à natureza rúptil da intrusão (Figura 3.8).

A rocha encaixante, que é o objeto deste estudo, é um ortognaisse de composição granodiorítica, coloração cinza escuro, bandamento metamórfico bem definido variando de granulação fina a média e em certos pontos nota-se uma transição, passando a rocha a apresentar bandamento mais grosso e pontos com concentrações maiores de biotita.



Figura 3.7 – Ponto de coleta das amostras. Notar a coloração amarronzada numa parte do dique que é fruto da alteração intempérica.



Figura 3.8 – Dique de Fonolito com coloração esverdeada e 2,5 metros de espessura cortando a rocha encaixante.

### 3.2.2 Caracterização estrutural

As direções preferenciais das foliações e fraturas foram determinadas com o uso de estereogramas e diagrama de roseta. Para a foliação foi realizado apenas o estereograma (Figura 3.9) e para a fratura foi realizado tanto o estereograma (Figura 3.10), quanto o diagrama de roseta (Figura 3.11).

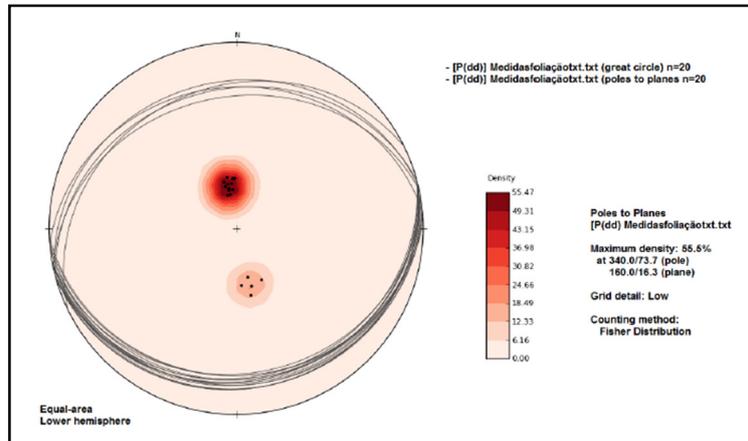


Figura 3.9 – Estereograma referente às medidas de foliação.

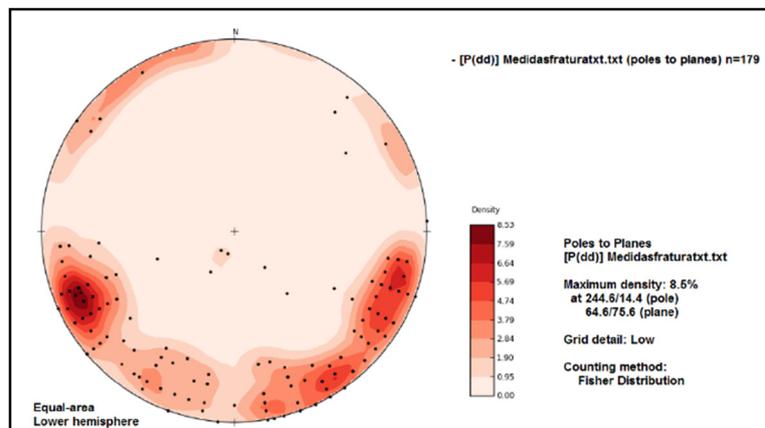


Figura 3.10 – Estereograma referente às medidas de fraturas.

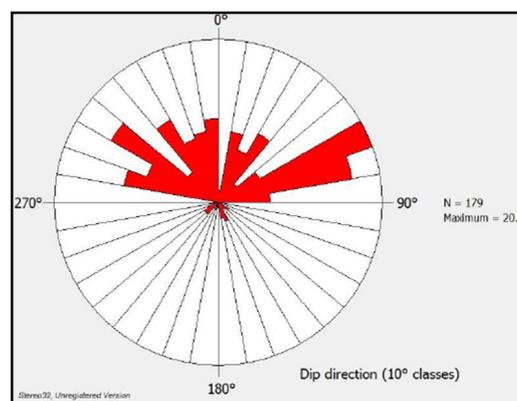


Figura 3.11 – Diagrama de Roseta referente às medidas de fraturas.

Nas frentes estudadas foram coletadas tanto medidas de fraturas quanto medidas de foliação. Em relação à foliação, foram obtidas 20 medidas com direções preferenciais de 170/15, aproximadamente, em relação às fraturas, foram coletadas 179 medidas, tendo sido produzido o diagrama de roseta (Figura 3.11) que indica que as direções preferenciais obtidas no campo foram de 70/70 e 310/80, aproximadamente. Na Figura 3.9, observamos que a foliação gnáissica é variável (mas não muito), com o predomínio de direções N-NO e S-SE. Esses valores podem ser perfeitamente observados no diagrama e eles se apresentam bastante coerentes com os dados estruturais da geologia regional obtidos para o Morro do Sandá. Na Figura 3.10, foi possível observar a partir dos pólos plotados no estereograma duas famílias de fraturas principais. Uma com direção Nordeste e outra com direção Noroeste. Essas informações também se assemelham com os dados estruturais da área de estudo.

### 3.2.3 Preparação dos corpos de prova

Para o estudo e a avaliação do comportamento mecânico das fraturas foram utilizados cinco blocos de rocha gnáissica retirados da pedreira Bangu. Desses blocos foram extraídos diversos corpos de prova cilíndricos (Figura 3.12a). Esses corpos de prova foram separados em corpos com fraturas naturais e corpos intactos.

A preparação dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio. Num primeiro momento, foram transportados blocos de 1 m<sup>3</sup> e logo após foram extraídos testemunhos cilíndricos através de uma perfuratriz com sistema de perfuração diamantado da marca Hilti, perfuratriz modelo DD 200 e coroa diamantada com diâmetro interno de 54 mm (Figura 3.12b).

Num segundo momento, esses testemunhos foram cortados nos tamanhos indicados nas sugestões da ISRM dos respectivos ensaios. Em virtude do diâmetro, foi necessária a utilização de uma serra de bancada. A serra da marca Arotec, cortadora metalográfica modelo Arocor 80, foi utilizada para o corte de testemunhos com 54 mm de diâmetro (Figura 3.12c).

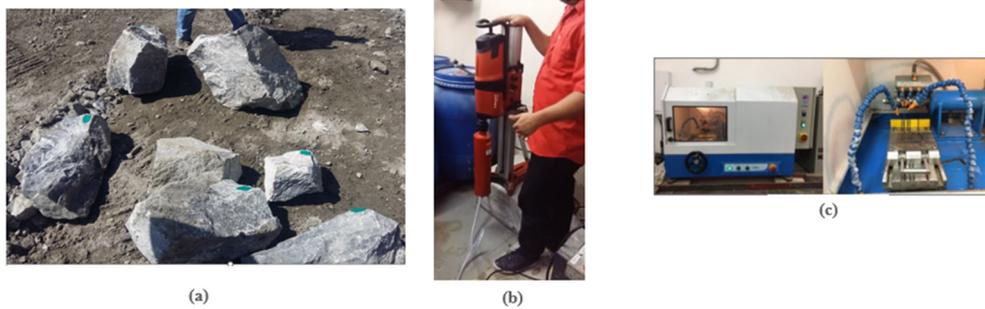


Figura 3.12 – (a) Blocos retirados da pedreira, (b) Extração de testemunhos utilizando a perfuratriz da marca Hilti, modelo DD 200 e (c) Cortadora metalográfica, utilizada para cortar corpos de prova com 54 mm de diâmetro.

Algumas fraturas foram geradas na máquina de ensaios universal da marca MTS, modelo 810 (Figura 3.13). Foi confeccionado um suporte e uma ponteira, ambos de madeira, para induzir fraturas nos corpos de prova. Todos os corpos de prova possuíam aproximadamente 54 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento.



Figura 3.13 – Método para geração de fraturas

Após a geração das fraturas foi usado um perfilômetro modelador manual (Figura 3.14a) para fazer a retirada dos perfis de rugosidade. Um programa desenvolvido por Alameda *et al.* (2014) foi utilizado para determinar o valor do coeficiente de rugosidade (JRC) digitalmente, de maneira a minimizar os erros da estimativa visual quando comparados na tabela de rugosidades, evitando assim qualquer viés de subjetividade que a comparação visual abrange. A Figura 3.14 apresenta as etapas do método de Alameda *et al.* (2014) que se inicia colocando o perfilômetro sobre uma folha branca translúcida em cima de uma mesa de desenho

com luz de Led. Em seguida, é tirada uma fotografia do perfil (fig. 3.14b). A fotografia é convertida para um formato monocromático, preto e branco (fig. 3.14c). No presente estudo, optou-se pelo formato de bitmap portátil (.pbm), pois, desta forma, cada pixel é lido como 1 ou 0 (preto ou branco). A conversão foi realizada com o software livre GIMP (desenvolvido por Spencer Kimball e Peter Mattis, Berkeley, CA, EUA). A próxima etapa consiste em processar o arquivo de imagem .pbm com um código no MATLAB.

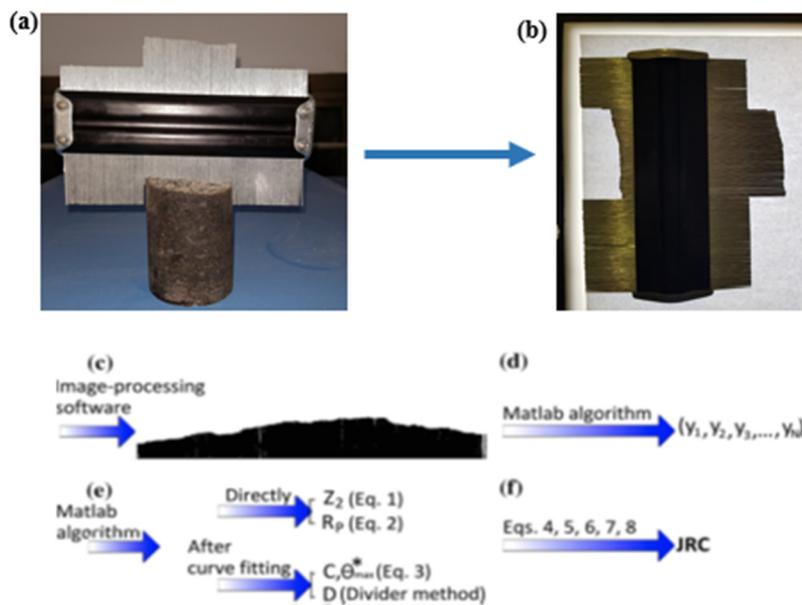


Figura 3.14 – Método proposto: a) posicionando o pente; b) tirando a fotografia no molde transparente; c) convertendo a fotografia em P&B; d) lendo um vetor da imagem; e) calculando os parâmetros e f) calculando o JRC. (Alameda *et al.* 2014).

Na Tabela 3, é apresentado um resumo da amostragem dos corpos de prova com as medidas de JRC, áreas e imagens do perfilômetro.

Tabela 3 – Resumo da amostragem dos corpos de prova.

Amostra	JRC		Área da Fratura (m <sup>2</sup> )	Imagem	Perfilômetro
	Z <sub>2</sub>	R <sub>P</sub>			
31	12,4	13,1	0,002316		
35	13,5	14,1	0,002298		
36	9,9	10,4	0,002281		
05	14,1	14,8	0,002302		
03	15,2	15,2	0,002600		
16	17,8	17,8	0,002285		
33	14,7	14,3	0,002302		
38	18,3	18,1	0,002403		
07	11,2	11,7	0,002310		
08	12,2	13,1	0,003246		
37	11,0	11,5	0,003154		
44	13	13,6	0,002302		
47	12,5	12,8	0,002321		
04	15,8	16,3	0,002629		
21	14,8	15,2	0,002381		
40	18,4	18,2	0,002481		
42	16,1	16,5	0,002324		
45	14,7	15,0	0,002338		
39	13,4	14,0	0,002294		
48	16,0	15,9	0,002311		

### 3.3 Método

A metodologia buscou um melhor entendimento da influência do cisalhamento cíclico no deslocamento acumulado em fraturas de rochas gnáissicas e envolveu etapas de caracterização física e mecânica de blocos de rocha gnáissica.

Primeiramente, o estudo analisou as propriedades físicas da rocha relacionadas aos índices físicos (massa específica e porosidade) e as propriedades mecânicas tais como: resistência à compressão uniaxial e resistência à tração.

Em outra etapa, foram geradas fraturas em corpos de prova, que representam a mesma rocha encaixante, cilíndricos e foram medidos o JRC da sua superfície. O intuito é comparar o comportamento mecânico da fratura com o deslocamento acumulado para diferentes níveis de JRC.

Para analisar o comportamento do deslocamento acumulado, uma bomba de fluxo foi acoplada ao equipamento de cisalhamento direto para medir a permeabilidade e a abertura hidráulica. O objetivo é avaliar o deslocamento vertical com a variação da rugosidade durante a fase de cisalhamento cíclico. Sensores de deslocamento também foram usados para medir o deslocamento vertical durante o ensaio.

A Figura 3.15 apresenta um organograma que sintetiza as propriedades que serão abordadas no estudo. Na caracterização dos materiais serão abordados os atributos físicos e mecânicos, e também os atributos mineralógicos, químicos e estruturais das rochas. As propriedades físicas analisadas são porosidade e massa específica e as propriedades mecânicas são as resistências à compressão uniaxial e à tração e o cisalhamento cíclico das fraturas.

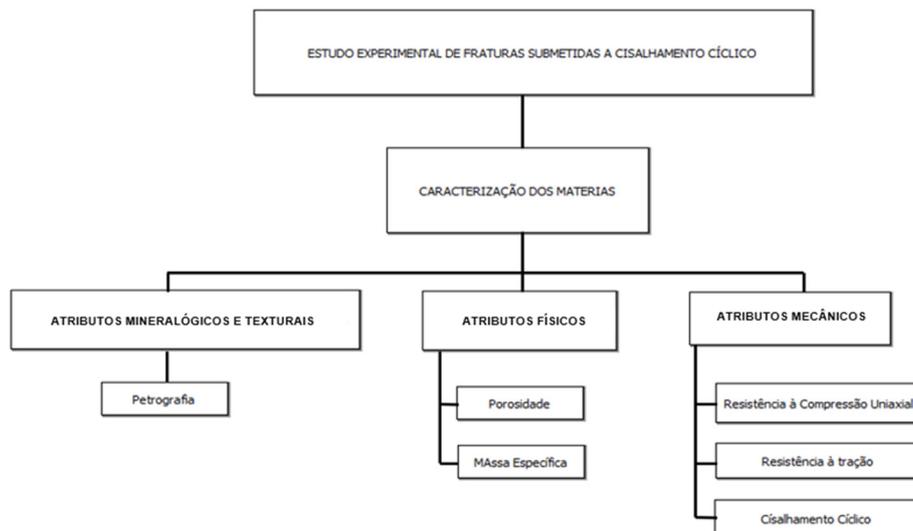


Figura 3.15 – Organograma dos ensaios realizados.

### 3.3.1 Análise Petrográfica

O estudo petrográfico é fundamental para a compreensão do comportamento físico-mecânico e de susceptibilidade à alteração, dentre outras (Costa, 2007).

Nesta parte do trabalho, as amostras foram enviadas para o laboratório de laminação do departamento de geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) para confecção das lâminas petrográficas. Em seguida as amostras foram analisadas macroscopicamente com utilização de lupa 10/20x e microscopicamente através de microscópio ótico com luz polarizada da marca Olympus, modelo CX31 com câmera (SC-30) acoplada para geração de imagens diretamente do microscópio no laboratório de Geotecnia da PUC-RJ (Figura 3.16).



Figura 3.16 – Microscópio ótico que será utilizado para realizar a análise petrográfica.

### 3.3.2 Caracterização dos Índices Físicos

A presença de poros na estrutura das rochas diminui a resistência e aumenta a deformabilidade (Sarda *et al.*, 1993; Palchik, 1999). Por essa razão, é essencial a quantificação da porosidade nas rochas analisadas. A caracterização dos índices físicos tem como objetivo obter a porosidade e a massa específica seca dos corpos de prova analisados neste trabalho. Foram caracterizados somente os corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão e tração de modo a ser representativo para os corpos de prova utilizados nos ensaios cíclicos.

Para a realização da caracterização, será seguida a sugestão da *International Society of Rock Mechanics (ISRM) – Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties and Swelling and Slake Durability Index Properties* (Ulusay, 2015). A metodologia utilizada nessa etapa pode ser dividida:

1. Os corpos de prova são imersos em água destilada e saturados dentro de um dessecador conectado a uma bomba de vácuo, cuja pressão não ultrapassa 800 Pa (6 torr);
2. É medida a massa submersa;
3. É medida a massa saturada;
4. Os corpos de prova são colocados em estufa por um período de 24 horas à temperatura de 105°C;
5. É medida a massa seca.

Em relação às especificações dos equipamentos, o dessecador a ser utilizado tem capacidade de 250 mm em plástico. A bomba de vácuo é da marca Primatec, modelo 132, com deslocamento de 2,9 m<sup>3</sup> e 48 lpm (Figura 3.17a). Foi montado um sistema com duas balanças de precisão, ambas da marca Ohaus (Figura 3.17b). A primeira com um gancho na parte inferior para medir a massa submersa, modelo Adventurer Pro AV8101P, com precisão de uma casa decimal. A segunda é utilizada para medir as massas saturada e seca, modelo Adventurer ARD110, com precisão de duas casas decimais. Para medir a massa submersa, é necessário utilizar uma rede de arames. A estufa a ser utilizada é da marca Nova Ética.

Com as três medidas obtidas (massa submersa, massa saturada e massa seca), através das relações contidas na sugestão da ISRM (Ulusay, 2015), é possível

calcular as propriedades desejáveis, massa específica seca e porosidade. Vale ressaltar que, em função das características da rocha estudada, gnaisses de composição que variam desde quartzo-dioríticas até os tipos granodioríticos, não foi considerada porosidade intrínseca. Outro aspecto que não foi considerado foi a perda de água superficial (poros superficiais), quando medida a massa saturada.



Figura 3.17 – (a) Dessecador e bomba de vácuo que serão utilizadas; (b) sistema montado para medir massa submersa e massa saturada.

### 3.3.3 Resistência à Compressão Uniaxial das Rochas

O ensaio de resistência à compressão simples ou uniaxial (UCS) é um dos ensaios mais comuns em mecânica das rochas para determinação da resistência e da deformabilidade das rochas. Por sua grande utilização, é considerado um parâmetro de caracterização do material.

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios da marca MTS, modelo 810, com garras hidráulicas e capacidade de carga de 500 kN, pertencente ao laboratório de Estruturas e Materiais (LEM-DEC) da PUC-Rio (Figura 3.18).

Foram utilizados dois transdutores de deslocamento linear (LVDT) da marca HBM, modelo TYP WI 5 mm em cada corpo de prova para medir a deformação axial do material. A prensa é controlada pelo *software* MTS TestSuite™ Multipurpose Elite (MPE) da marca MTS. A aquisição de dados da instrumentação foi realizada pelo *software* CATMAN Easy AP, da empresa HBM. Força e deslocamento do equipamento foram controlados através do módulo 1, pelo

sistema MX-1615B, enquanto os LVDT foram controlados através do módulo 2, sistema MX-440B.



Figura 3.18 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial realizado na máquina de ensaios universais da marca MTS, modelo 810.

### 3.3.4 Ensaio Indireto de Resistência à Tração (Ens. Brasileiro)

As rochas, em geral, apresentam resistência à tração muito menor que a resistência à compressão. Existem metodologias para determinar a resistência à tração de maneira direta e indireta. Os ensaios diretos apresentam grandes dificuldades experimentais, o que leva a uma maior utilização de métodos indiretos.

O ensaio brasileiro é o método indireto mais utilizado. Ele consiste na aplicação de uma força de compressão diametral, onde o corpo de prova rompe por tração. É um ensaio de baixo custo quando comparado com ensaios diretos, apresentam rápida execução, fácil adequação de máquinas para sua realização e facilidade na preparação das amostras.

Os ensaios foram realizados seguindo as sugestões da ISRM (Bieniawski & Hawkes, 1978). A geometria do corpo de prova tem forma de disco e possui relação

diâmetro-espessura de 2:1. No presente trabalho, será utilizado o diâmetro mínimo sugerido pela ISRM, 54 mm, e espessura de 27 mm.

Conforme indicado pela ISRM, será utilizado um suporte de aço com dois mordentes curvos, superior e inferior, ligados por dois pinos guias. A amostra será colocada no suporte, e o conjunto levado até uma prensa de ensaios universais da marca *MTS Systems Corporation*, modelo 810 com garras hidráulicas e capacidade de carga de 500 kN, pertencente ao laboratório LEM-DEC (Figura 3.19).

A prensa é controlada pelo *software MTS TestSuite™ Multipurpose Elite (MPE)* da marca *MTS Systems Corporation* e serão coletados os dados da força axial aplicada, tempo e deslocamento axial.

A taxa de carregamento utilizada é recomendada pela ISRM (Bieniawski & Hawkes, 1978), 200 N/s. A resistência à tração é calculada de acordo com a teoria da elasticidade através da expressão abaixo:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dt} = 0,636 \frac{P}{dt} \quad (eq. 3.1)$$

Onde:

$P$  – Carga de ruptura;

$d$  – Diâmetro do corpo de prova;

$t$  – Espessura do corpo de prova.

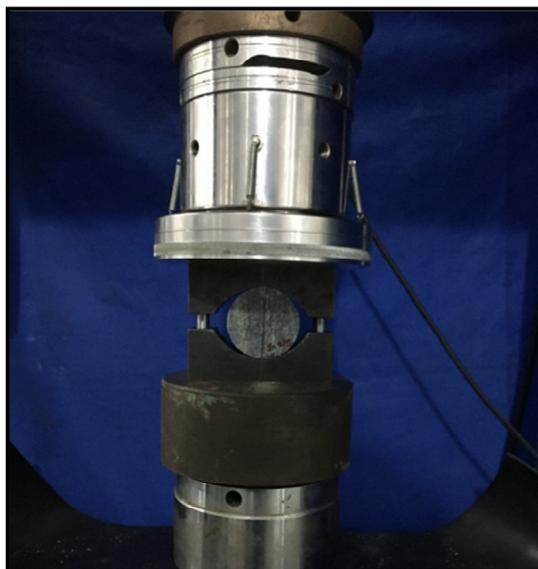


Figura 3.19 – Ensaio para determinação da resistência à tração indireto (Ensaio Brasileiro).

A ruptura ocorre ao longo do diâmetro do disco no plano paralelo à direção de carregamento. A carga para o cálculo é referente à primeira fissura, pois rupturas secundárias são produzidas quando o carregamento é mantido. Fissuras secundárias também podem ocorrer por imperfeições do corpo de prova ou na execução do ensaio. É comum, após a primeira fratura, a amostra apresentar uma pequena diminuição na sua resistência, para, em seguida, ocorrer aumento da carga, inclusive superior à carga correspondente à fratura primária.

### 3.3.5 Resistência ao Cisalhamento Direto

O cisalhamento de discontinuidades de um maciço rochoso corresponde ao fenômeno de atrito das paredes e à ruptura das irregularidades das superfícies do plano de deslizamento. No caso de discontinuidades não preenchidas, a rugosidade, a resistência à compressão e as condições das paredes são importantes. E, no caso de discontinuidades preenchidas, as propriedades físicas e mineralógicas do material de preenchimento são fundamentais (Barton and Choubey, 1977).

O ensaio de cisalhamento direto mede a resistência ao cisalhamento de pico e residual em função da tensão normal aplicada a um plano de cisalhamento. Os resultados são importantes para análises de equilíbrio limite de problemas de estabilidade de taludes ou análises de estabilidade de fundação de barragens (Muralha *et al.*, 2013). A partir dos resultados obtidos nesse ensaio é possível a determinação dos parâmetros de coesão aparente e ângulo de atrito de uma determinada interface, sujeita às forças normal e cisalhante, estabelecida pela envoltória de resistência.

#### 3.3.5.1 Cisalhamento Cíclico

O equipamento de cisalhamento direto desenvolvido e construído na PUC (Córdoba Rodriguez, 2018) foi utilizado para estudar o comportamento cíclico de juntas de rochas sob as condições de carregamento cíclico pré-pico.

A estrutura do equipamento é constituída por perfis de aço, calculados com cargas maiores que as aplicadas nos ensaios, com o objetivo de evitar distorções durante o ensaio. O equipamento permite aplicação simultânea de tensões normais e cisalhantes, através de atuadores hidráulicos servo-controlados da marca *MTS Systems Corporation* (Figura 3.20). O atuador que será utilizado na direção vertical

tem capacidade máxima de 100 tf, enquanto o atuador utilizado na direção horizontal tem capacidade máxima de 200 tf.

Para a realização do ensaio de cisalhamento cíclico algumas modificações no equipamento foram propostas para atender as características do ensaio, como mostrado na Figura 3.21.

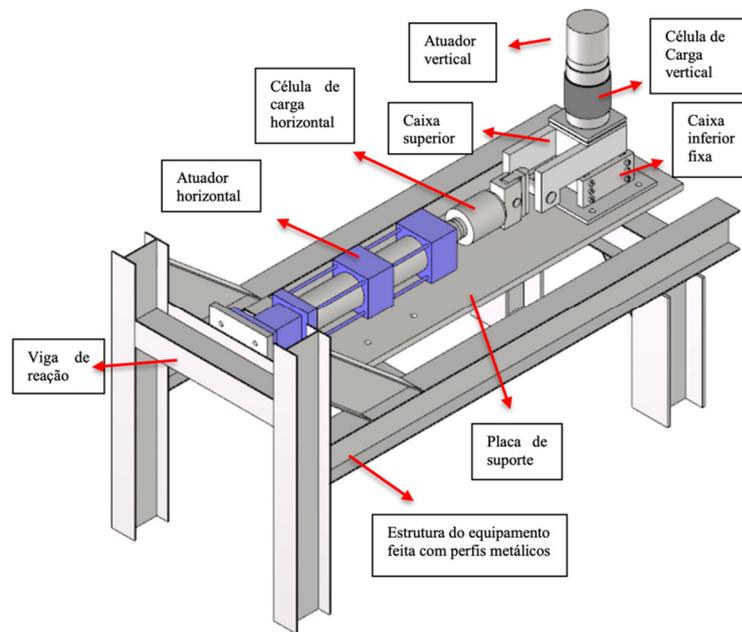


Figura 3.20 – Representação esquemática do equipamento (Córdova Rodrigues, 2018).

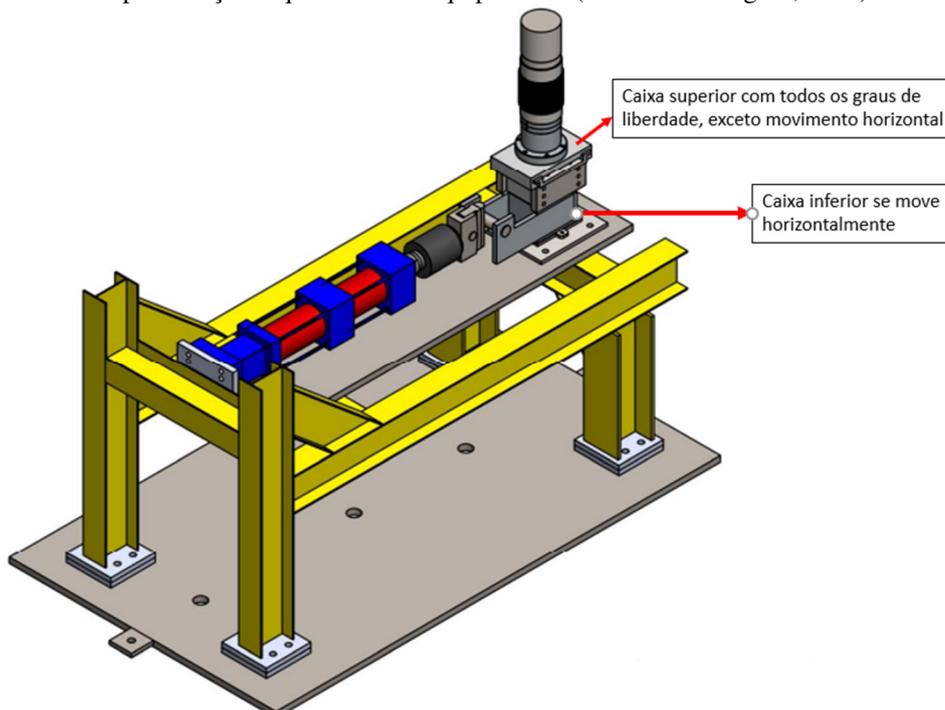


Figura 3.21 – Representação esquemática do equipamento de cisalhamento direto com mudanças nas caixas de cisalhamento.

As mudanças foram realizadas para simular as quedas de blocos em taludes rochosos com baixas tensões normais. A caixa inferior que antes era fixa na mesa, passou a se mover horizontalmente conectada no atuador horizontal e todos os outros graus de liberdade são restritos. A caixa superior que antes era conectada no atuador horizontal, possui todos os graus de liberdade possíveis (rotação e translação), exceto translação na direção horizontal. Essa restrição foi possível pois um suporte com rótulas foi colocado atrás e na frente da caixa superior impedindo a movimentação na direção horizontal. Além disso, a caixa inferior permite a entrada de fluxo no ensaio (Figuras 3.22 e 3.23). LVDT são posicionados na lateral da caixa para aquisar os movimentos verticais da caixa superior (ensaios com baixas tensões normais) e um LVDT na frente da caixa inferior para aquisar os movimentos horizontais.

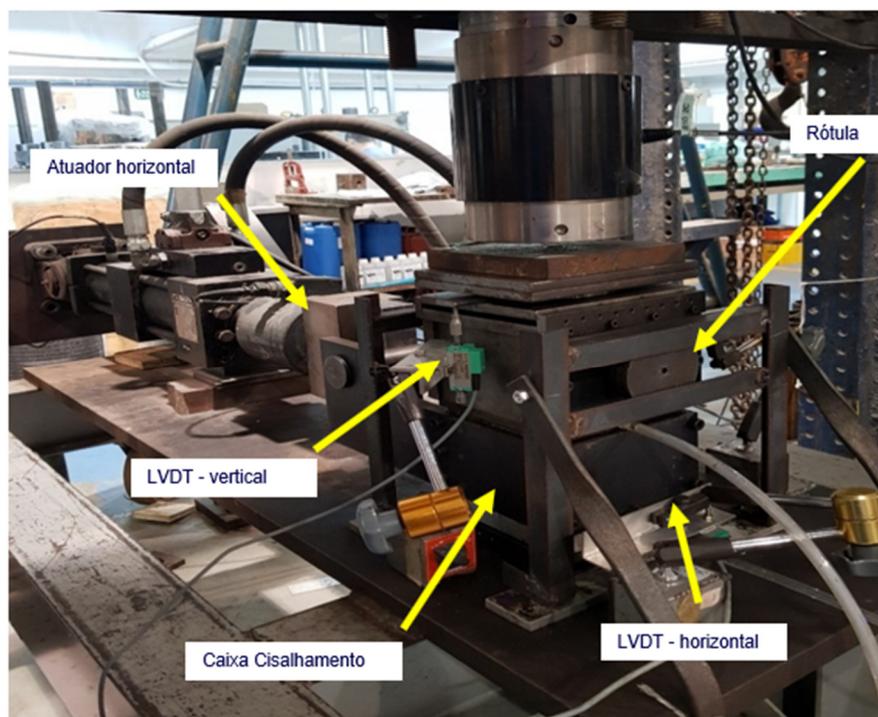


Figura 3.22 – Equipamento de cisalhamento direto com caixas modificadas.

A caixa conta com uma entrada de fluxo que esta acoplada a uma bomba compacta da marca Knauer que possui vazão e pressão máxima de respectivamente 10 ml/min e 40 MPa. Um transdutor de pressão da marca Gems com capacidade de

pressão de 1 MPa foi utilizado para medir a pressão de injeção do fluido na entrada durante o ensaio (Figura 3.23).

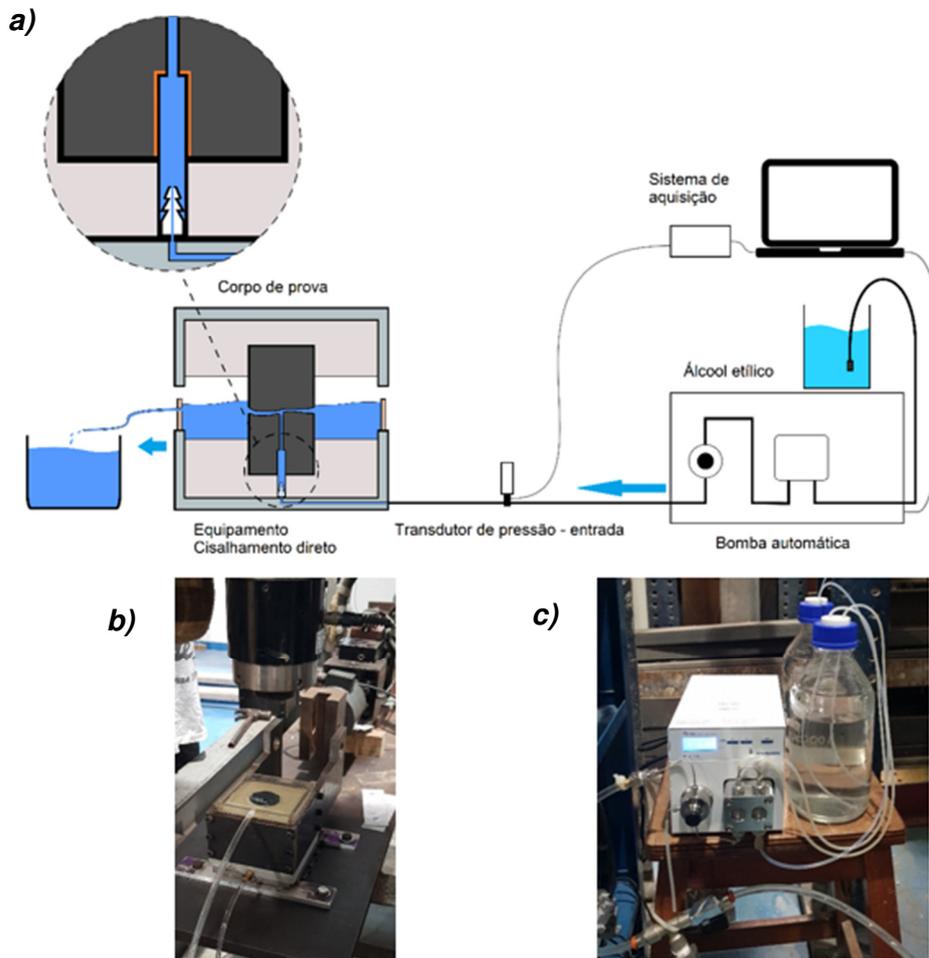


Figura 3.23 – (a) Bomba Knauer com transdutor de pressão. As Figuras (b) e (c) mostram a entrada e saída da água.

O equipamento possui duas caixas de cisalhamento, uma inferior e outra superior, que abrigam o corpo de prova, ficando metade do corpo de prova em cada parte. As caixas têm dimensões internas de 155,4 mm x 155,4 mm e altura igual a 100,0 mm. O corpo de prova é posicionado com a fratura na direção horizontal e cimentado nas caixas com gesso pedra tipo III, material odontológico à base de sulfato de cálcio que apresenta rápida secagem e alta resistência inicial e logo após a secagem é colocada uma peça de acrílico em cima da caixa inferior para coleta da água (Figuras 3.24). A Figura 3.25 apresenta um ensaio com tensão normal de 100 kPa (o peso da caixa juntamente com placas de ferro é suficiente para chegar nessa tensão) em andamento.

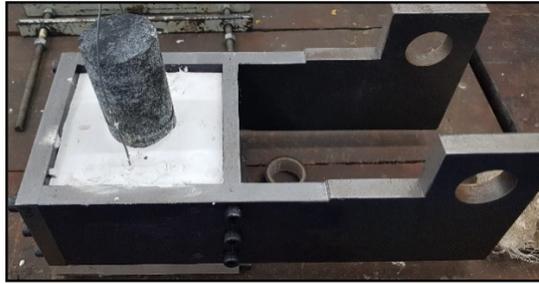


Figura 3.24 – Preparação do corpo de prova nas caixas de cisalhamento.

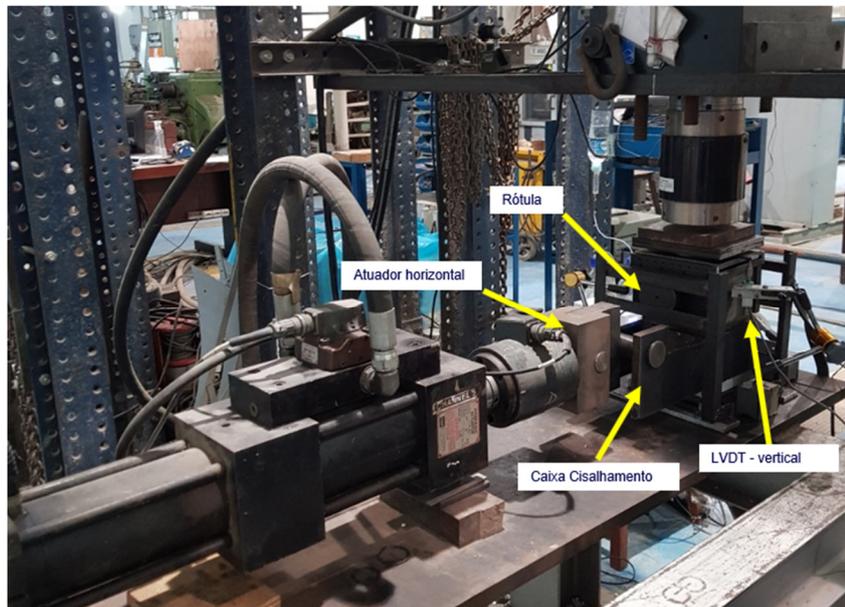


Figura 3.25 – Equipamento com ensaio de cisalhamento cíclico (tensão normal de 100 kPa) em andamento.

### 3.3.5.2 Procedimento do ensaio

Para o estudo do comportamento mecânico e hidráulico de fraturas sob condições de carregamento cíclico cisalhante pré-pico, foram realizados 23 ensaios de cisalhamento cíclico com controle de tensão. As tensões normais utilizadas foram de 100 e 1000 kPa em amostras com fraturas naturais e induzidas. As amostras foram separadas por valores de JRC baixos (10 -14) e altos (14 – 18) para cada uma das tensões normais aplicadas. O critério adotado para interrupção dos ensaios cíclicos foi de 2000 ciclos, porém alguns ensaios finalizaram antes devido ao rompimento da amostra (abertura da junta).

Primeiramente, foi realizado um ensaio de cisalhamento direto no modo controle de deslocamento com uma taxa de 1,0 mm/min em amostra serrada para obter a máxima tensão cisalhante na ruptura (48 kPa para tensão normal de 100 kPa e 521 kPa para tensão normal de 1000 kPa). A resistência ao cisalhamento direto obtida fornece os parâmetros do ensaio de cisalhamento cíclico. Com base nos resultados de Jafari *et al.* (2003), se a máxima tensão cisalhante cíclica aplicada for inferior a 50% da resistência de pico em ensaios de cisalhamento direto, a resistência ao cisalhamento dos maciços rochosos seria quase constante após um número elevado de ciclos. Portanto, neste estudo, as tensões cisalhantes pré-pico aplicadas foram tomadas como aproximadamente 60% da resistência ao cisalhamento direto (26 kPa e 326 kPa) de modo a garantir que se esteja distante da ruptura.

As frequências do carregamento cíclico adotadas são de 0,1 e 0,01 Hz de modo a simular blocos quase estáticos sofrendo influência das flutuações diárias de temperaturas. Essas frequências são de 10 a 100 vezes menores que as frequências utilizadas por Fathi *et al.* (2016) nos seus estudos sobre baixos tremores ou terremotos fracos.

Após o ajuste da tensão cisalhante cíclica, foram aplicadas tensões normais de 100 kPa (baixa) e 1 MPa (alta) para três grupos de amostras que continham diferentes tipos de JRC. Os valores das tensões normais adotados simulam tensões em taludes rochosos em superfície (aprox. 3,7 e 37 metros de altura respectivamente).

A abertura hidráulica foi calculada usando a equação 2.1 descrita no tópico 2.2.4.

O conteúdo de material cominuído depositado após o ensaio foi obtido quantificando a porcentagem da área de material depositado no fundo da caixa por um processo interativo usando o ImageJ (Rasband, 2004) e um programa manipulador de imagens chamado GIMP. Este software possui um recurso para ajustar os valores de limite máximo e mínimo para diferentes cores. A escala de cinza varia de 0 (preto) e 255 (branco). Os grãos de quartzo e feldspato, que variam de 220 a 155, são muito mais brancos que a biotita, que varia de 10 a 80. As estimativas da área afetada pelo cisalhamento foram realizadas pelo mesmo método. Todas as fotografias foram tiradas com a mesma resolução de câmera (12 MP) e iluminação.

O procedimento foi interativo (fig 3.26) e parecido com o método utilizado por Cacciari (2019) para obtenção da porcentagem de biotita em planos de fraturas, consistindo em carregar a fotografia no Gimp, recortar a amostra do centro e alterar a imagem para a escala de cinza. Como o material depositado é formado apenas por minerais micáceos de cor escura, foi usado um método de estimativa do cálculo da área. Esse valor é uma estimativa do total de material cominuído depositado.

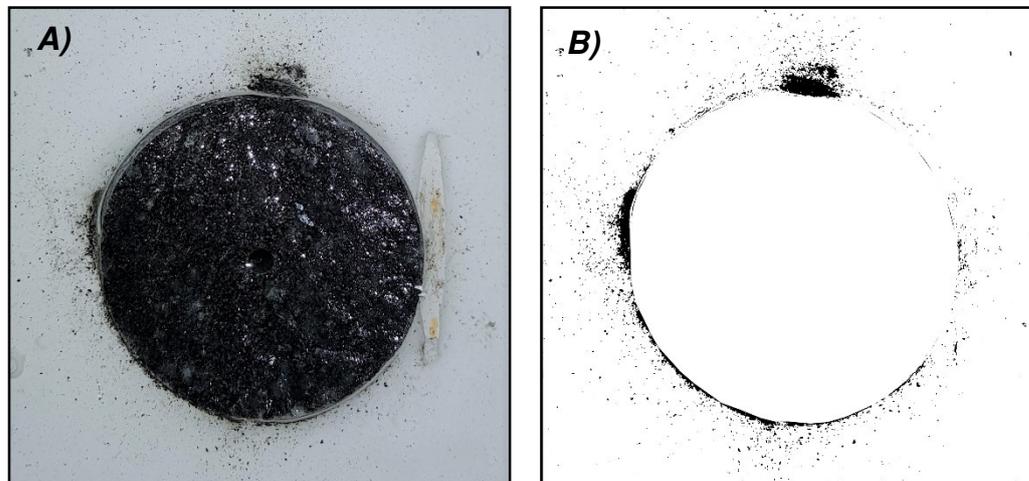


Figura 3.26 – Exemplo da obtenção da porcentagem de material depositado no fundo da caixa. (A) imagem após o ensaio e (B) imagem processada em tons de preto e branco.

A tabela 4 apresenta as amostras, os valores das tensões aplicadas, a frequência e os valores de JRC. Foram estipulados valores limites de baixo (10 a 14) e alto (14 a 18) JRC para cada valor de tensão normal aplicada. A quantidade de ciclos estipulada para a finalização do ensaio foi de 2000 ciclos para frequência

de 0,1 Hz e 200 ciclos para frequências de 0,01 Hz. Entretanto algumas amostras finalizaram antes por rompimento.

Tabela 4 – Resumo dos corpos de prova e condições de carregamento aplicada para cada ensaio.

<b>Amostra</b>	<b>JRC (Z<sub>2</sub>)</b>	<b>Tensão Normal (kPa)</b>	<b>Tensão Cisalhante Pré-pico (kPa)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>JRC / Tensão</b>	
<b>36</b>	9,9	100	26	0,1	<b>Baixo</b>	<b>Baixa Tensão</b>
<b>31</b>	12,4	100	26	0,1		
<b>35</b>	13,5	100	26	0,1		
<b>05</b>	14,1	100	26	0,1	<b>Alto</b>	
<b>33</b>	14,7	100	26	0,1		
<b>03</b>	15,2	100	26	0,1		
<b>16</b>	17,8	100	26	0,1		
<b>38</b>	18,3	100	26	0,1		
<b>39</b>	13,4	100	26	0,01	<b>Baixo</b>	<b>Baixa Tensão</b>
<b>48</b>	16,0	100	26	0,01	<b>Alto</b>	
<b>37</b>	11	1000	326	0,1	<b>Baixo</b>	<b>Alta Tensão</b>
<b>07</b>	11,2	1000	326	0,1		
<b>08</b>	12,2	1000	326	0,1		
<b>47</b>	12,5	1000	326	0,1		
<b>44</b>	13,0	1000	326	0,1		
<b>45</b>	14,7	1000	326	0,1	<b>Alto</b>	
<b>21</b>	14,8	1000	326	0,1		
<b>04</b>	15,8	1000	326	0,1		
<b>42</b>	16,1	1000	326	0,1		
<b>40</b>	18,4	1000	326	0,1		

## 4 Apresentação e Análise dos Resultados

### 4.1 Análise Petrográfica

A frente da pedreira escolhida para amostragem apresenta rochas ortognaíssicas de composição quartzo diorítica a granodiorítica. São rochas fortemente bandadas e muito deformadas.

A principal rocha encaixante dessa frente é um ortognaisse de cor cinza variando a cinza escura, mesocrático, equigranular com granulação fina e foliação marcada por bandamento composicional de níveis formados por quartzo, microclina, biotita primária e hornblenda e biotita como pseudomorfo a partir da hornblenda. Por vezes, ocorre intensamente deformado, fraturado e migmatizado, apresentando dobras intrafoliais e estruturas venulares que são suficientes para gerar uma homogeneização dos materiais envolvidos. Esse processo gera uma transição em relação à textura, passando a rocha a apresentar zonas maiores segregadas de leitos máficos enriquecidas em biotita e hornblenda. São comuns os veios aplíticos e pegmatitos com espessura centimétrica, concordantes ou não com a direção da foliação, preenchendo planos de fraturas relacionados às zonas de cisalhamento. O contato com o dique de fonolito é brusco causando deformação e variados graus de assimilação na borda de contato. O dique de fonolito corresponde a uma rocha de composição intermediária alcalina, afanítica, leucocrática de cor verde, granulometria muito fina, sendo constituído por feldspato alcalino e feldspatoides. Por se tratar de uma rocha alcalina insaturada em sílica é impossível a presença de quartzo em equilíbrio químico.

Faturamentos são comuns por toda a pedreira e nesse segmento ocorrem conjugadas em duas famílias principais N/NE - N/NW gerando grande quantidade de blocos devido à interseção de planos ortogonais. Observa-se nos planos de fraturas próximo à zona de contato dique/rocha encaixante zonas oxidadas de cor avermelhada provocadas por intemperismo químico e inclusões do fonolito nas bordas do ortognaisse gerando alterações hidrotermais superficiais (Figuras 4.1 e 4.2).

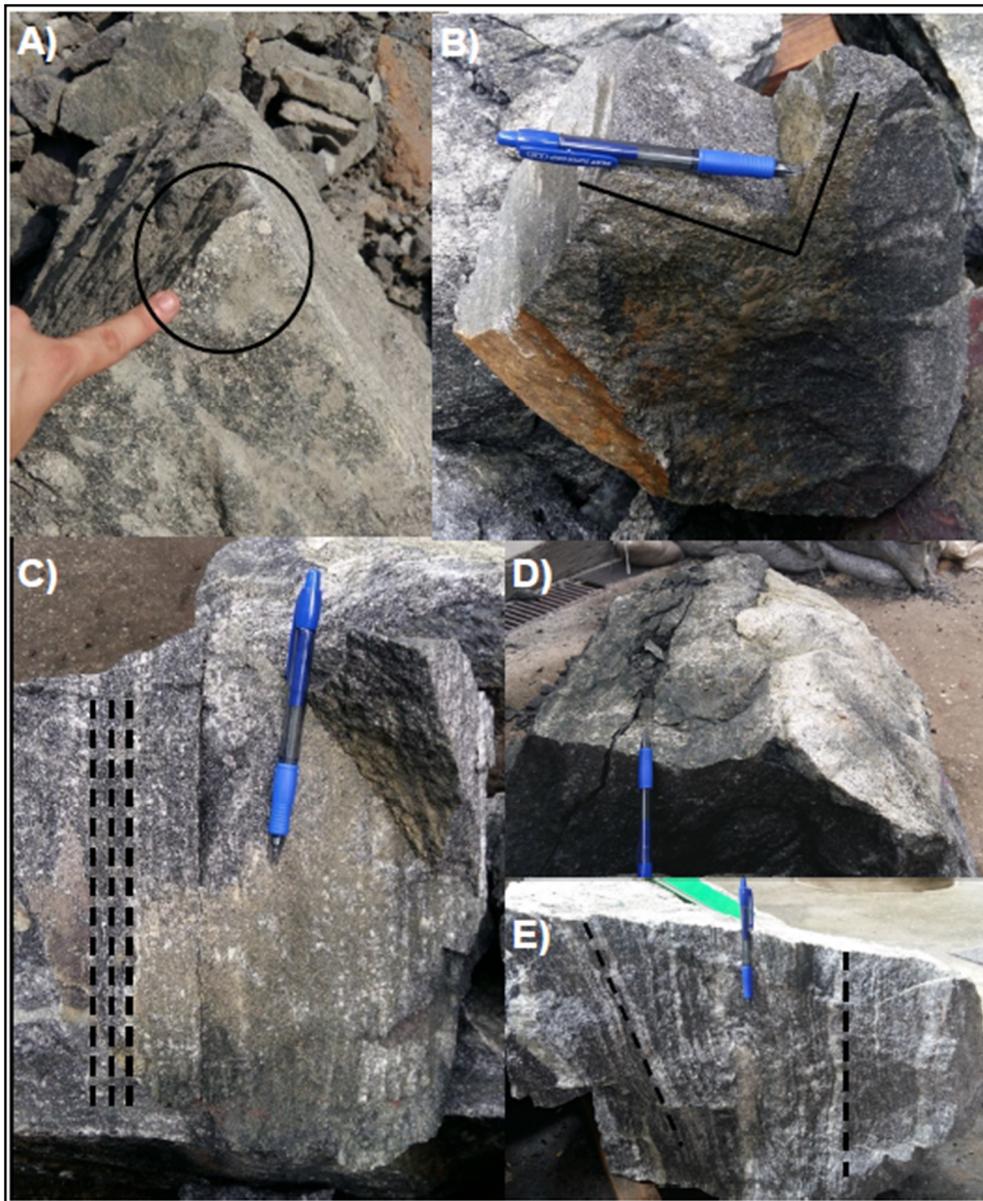


Figura 4.1 – Aspecto macroscópico dos blocos de rochas amostrados. a) Plagioclásio esbranquiçado devido à alteração hidrotermal e processos metamórficos; b) Padrão ortogonal provocado pela interseção de planos de fraturas ortogonais; c) Bandamento gnáissico fino bem marcado; d) Fratura associada à foliação; e) Bandamento gnáissico grosso bem marcado.

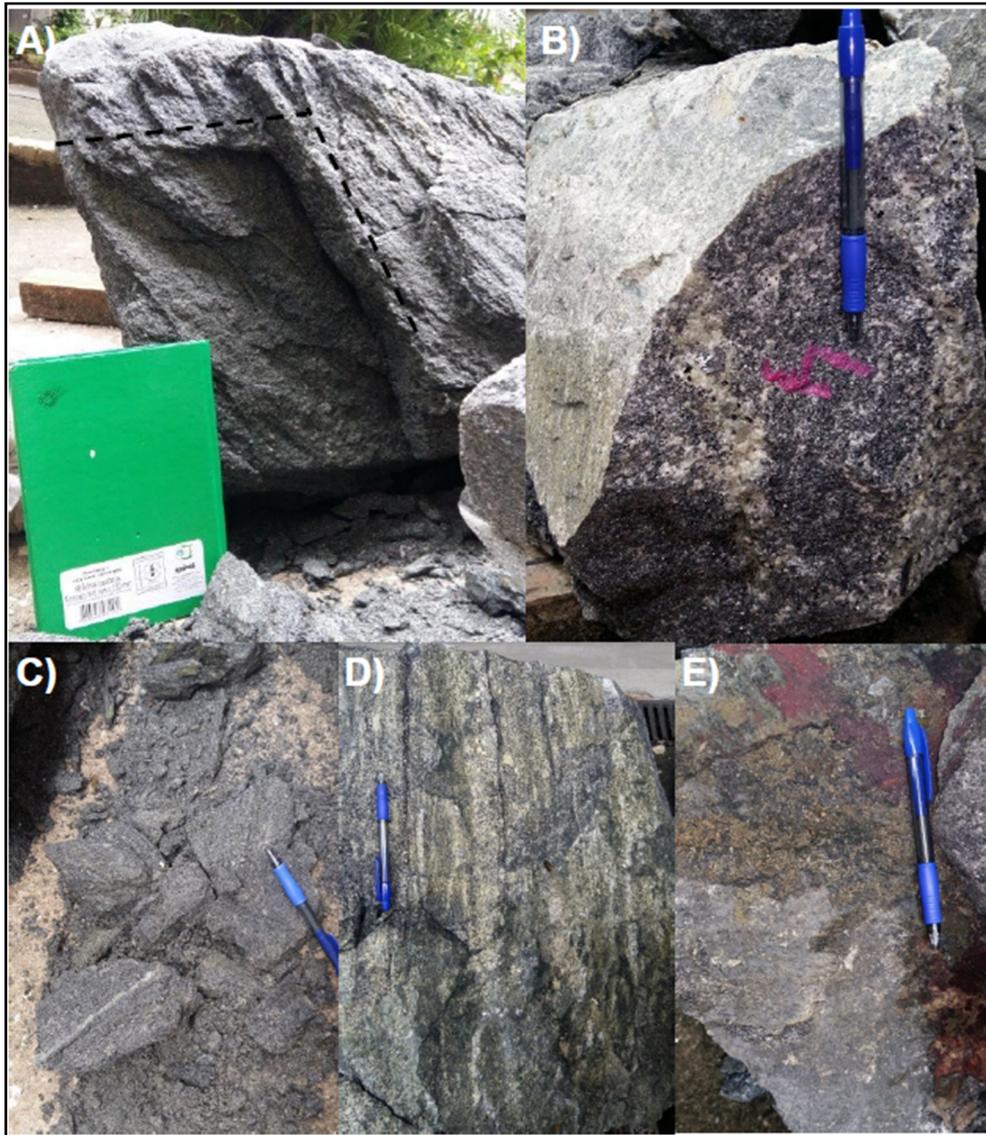


Figura 4.2 – Aspecto macroscópico dos blocos das rochas amostrados. a) Fratura conjugada em banda máfica com grande quantidade de biotita e hornblenda alterada; b) Veio pegmatítico; c) Rocha friável em zona homogênea com bandamento incipiente; d) ortogneisse preenchido com fonolito; e) Marcas de oxidação em planos de fratura.

Microscopicamente a rocha tem textura lepidonematoblástica com foliação definida por bandas alternadas de espessura fina formada por uma banda leucocrática de plagioclásio, quartzo e raramente biotita e outra banda mesocrática rica em biotita e hornblenda. Como minerais acessórios são identificados apatita zircão e minerais opacos e, como produtos secundários relativamente comuns muscovita, sericita, clorita e carbonato.

A composição modal da rocha é dada por: plagioclásio (60%), quartzo (18%), biotita (15%), hornblenda (8%) e outros (apatita, minerais opacos, zircão, titanita e minerais secundários (4%) (Figura 4.3).

A banda leucocrática possui textura do tipo nematoblástica de granulometria variando de fina a média. O plagioclásio ocorre em grãos hipidioblástico, de hábito prismático e granulometria média (1 a 5 mm) e apresenta perfeita geminação (leida albita). O quartzo ocorre em cristais xenoblásticos, com hábito granular e por vezes ameboide, com cristais recristalizados (padrão poligonal) e forte extinção ondulante. Sua granulometria varia de fina (<1 mm) a média (5 mm) com grãos límpidos, em geral ocupando os espaços intersticiais e inclusos dentro de cristais de plagioclásio. A biotita ocorre em menor proporção nessa banda e apresenta grãos hipidioblásticos de hábito planar e cor marrom, com granulometria variando de fina (0,1 a 1 mm) a média (1 a 4 mm).

Na banda mesocrática ocorre em maiores proporções biotita e hornblenda. A biotita possui granulometria variando de fina a grossa (0,1 a 1 cm), hipidioblástica a idioblástica, hábito tabular, cor marrom e intenso pleocroísmo. Alguns grãos apresentam inclusões de minerais opacos, sendo fruto dos processos de alteração hidrotermal. Sua associação com a muscovita é evidente, sendo esta observada comumente crescendo a partir das clivagens e de suas bordas. Observa-se em grande parte o truncamento da foliação, com cristais de biotita sobrepostos. A hornblenda tem ocorrência mais restrita, bordejando grãos de biotita e, quando em grão individualizados, tem cor verde e hábito tabular com forte pleocroísmo.

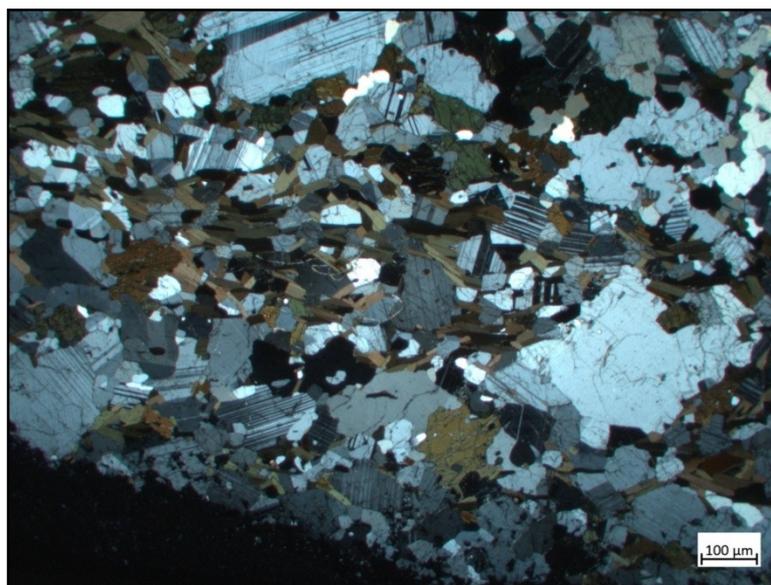


Figura 4.3 – Fotomicrografia apresentando o aspecto geral da textura lepidonematoblástica apresentando o bandamento metamórfico/estrutural preservado.

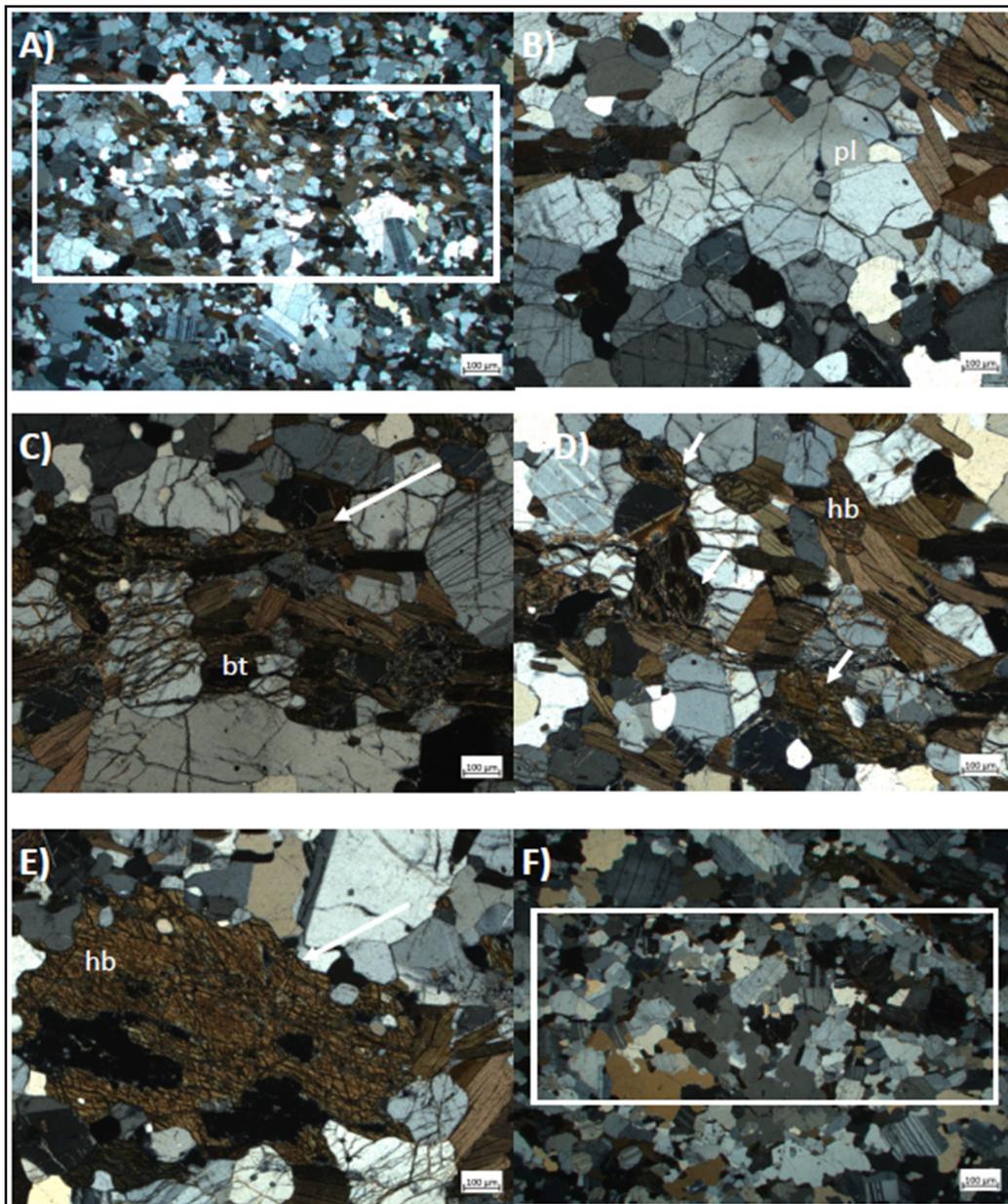


Figura 4.4 – Fotomicrografia do quartzo Diorito. A) Textura nematoblástica; B) Fraturamento de grãos por stress deformacional; C) Controle da alteração imposta pelas fraturas; D) hornblenda alterada a partir dos planos de clivagens; E) Estruturação da hornblenda por conta do entrelaçamento dos planos de clivagem; F) Textura granoblástica. Legenda: pl: plagioclásio; hb: hornblenda; bt: biotita.

## 4.2 Caracterização por Índices Físicos

No presente trabalho, os índices físicos considerados foram porosidade, massa específica seca e peso específico seco. Esses índices definem as relações básicas da rocha.

Ao todo, foram caracterizados seis corpos de prova (íntactos) dos quais três foram usados na realização de ensaios de tração indireta (ensaio brasileiro) e três usados na realização de ensaios de compressão uniaxial. O resumo da caracterização está apresentado na tabela 5.

Tabela 5 – Resumo da caracterização dos índices físicos.

Amostra	Porosidade (%)	Massa Específica Seca (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Específico Seco (kN/m <sup>3</sup> )
U-1	0,78	2,75	26,95
U-2	0,78	2,76	27,08
U-3	0,99	2,75	26,82
B-1	1,95	2,74	26,86
B-2	1,14	2,76	27,02
B-3	1,25	2,72	26,63

As rochas metamórficas têm em geral baixa porosidade, sendo mais baixa nas rochas de elevado grau metamórfico. Rochas alteradas podem ter sua porosidade aumentada devido às ações do intemperismo como desagregação e decomposição. A porosidade média das rochas analisadas é de aproximadamente 1,15%. O valor da amostra B-1 teve um aumento de aproximadamente 70% em relação às outras amostras devido a possíveis micro fraturas internas ao corpo de prova.

As variações de massa específica seca e, conseqüentemente, o peso específico seco foram sutis e apresentaram valores médios de aproximadamente 2.75 g/cm<sup>3</sup> e 26.90 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente.

Menezes Filho (1993) e Santos (2004) apresentaram valores médios das propriedades físicas de gnaisses facoidais da cidade do Rio de Janeiro, seguindo as sugestões da ISRM (1981). Apesar de as litologias apresentarem protólitos diferentes das rochas analisadas no presente trabalho, elas são semelhantes, sendo possível realizar uma comparação entre os resultados. Pires (2018) apresentou

valores médios dos índices físicos de rochas gnáissicas na pedreira Bangu para diferentes graus de alteração (sã, medianamente alterada e alterada). As tabelas 6 e 7 apresentam os valores médios das porosidades e dos pesos específicos secos, respectivamente.

Tabela 6 – Resultados das porosidades médias encontradas nos trabalhos citados.

Grau de Alteração	Porosidade (%)	Santos (2004) Porosidade (%)	Menezes Filho (1993) Porosidade (%)	Pires (2018) Porosidade (%)
Rocha sã	1,15	1,03	0,75	0,79
Rocha Medianamente Alterada	-	4,81	3,78	1,75
Rocha alterada	-	-	6,76	5,41

Tabela 7 – Resultados dos pesos específicos médios encontradas nos trabalhos citados.

Grau de Alteração	Peso Específico Seco (kN/m <sup>3</sup> )	Santos (2004) Peso Específico Seco (kN/m <sup>3</sup> )	Menezes Filho (1993) Peso Específico Seco (kN/m <sup>3</sup> )	Pires (2018) Peso Específico Seco (kN/m <sup>3</sup> )
Rocha sã	26,90	27,10	26,45	26,61
Rocha Medianamente Alterada	-	26,00	25,35	26,11
Rocha alterada	-	-	24,05	25,64

Os resultados obtidos foram similares aos resultados apresentados nos respectivos trabalhos. As rochas analisadas são classificadas como rocha sã e não apresentaram grau de alteração. Pires (2018) já havia estudado rochas dessa região e os resultados desse trabalho foram próximos dos encontrados por ele para rocha sã. As pequenas variações na porosidade se devem ao fato dessas rochas estarem na borda de um dique de fonolito e possuírem micro fraturas que por vezes são preenchidas por material vulcânico (Figuras 4.1 a 4.4).

### 4.3 Ensaio de Resistência à Compressão Uniaxial

Foram ensaiados três corpos de prova de acordo com a norma sugerida pela ISRM (1979a). A ISRM classificou as rochas segundo a resistência à compressão simples tendo como parâmetros limites os termos extremamente brandos e extremamente resistentes. Na tabela 8 são apresentados os resultados dos ensaios em função da resistência à compressão simples (UCS).

Tabela 8 – Resumo dos resultados do ensaio de compressão uniaxial.

Amostra	UCS (MPa)	Deformação Axial (%)
U-1	25,16	0,08
U-2	41,11	0,11
U-3	41,84	0,20

Os resultados demonstraram baixa deformação axial para todas as amostras e resistência à compressão uniaxial média a baixa. Apesar de serem rochas sãs, são rochas anisotrópicas que apresentam microfraturas preenchidas por material vulcânico, possuindo baixa resistência à compressão e comportando-se, por vezes, como rochas brandas.

Vale ressaltar que as amostras possuíam bandamento gnáissico bem marcado, algumas vezes esse bandamento era de difícil marcação e/ou incipiente devido à intensa deformação, e portando deveriam apresentar resistência à compressão superior às apresentadas. Contudo, essas rochas associadas a micro fraturas geraram a queda dos resultados de resistência mesmo apresentando resultados de baixa porosidade (Figura 4.4).

Estudos realizados por Pires (2018) na mesma pedreira demonstraram que rochas medianamente alteradas por intemperismo apresentavam valores de UCS superiores às rochas sãs devido à mudança de granulometria e bandamento gnáissico incipiente. Tais características podem estar associadas à mudança de comportamento mecânico dessas rochas.

#### 4.4 Ensaio Indireto de Resistência à Tração (Ens. Brasileiro)

Foram realizados três ensaios brasileiros para determinação da resistência à tração. Na tabela 9 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 9 – Resumo dos resultados do ensaio brasileiro.

Amostra	Tração $\sigma_t$ (MPa)
B-1	9,0
B-2	7,7
B-3	6,2

As rochas usadas no ensaio não possuíam controle de foliação, pois apresentavam diversas estruturas (migmatíticas, dobras, entre outras) dificultando sua medida.

Os resultados apresentaram uma diferença de 3 MPa entre a amostra B-1 e B-3, porém as amostras se comportaram como rochas sãs com alto valor de resistência à tração e essa variação se deve à direção da foliação.

Os resultados de tração para rocha sã se assemelham aos resultados de Pires (2018) que com base em ensaios de tração para rocha sã na mesma região obteve valores variados com média de 6,33 MPa.

## 4.5 Cisalhamento cíclico

A seguir são apresentados os resultados para os três grupos de amostras (Tabela 4): baixa tensão normal (100 kPa) com frequência de 0,1 e 0,01 Hz e alta tensão normal (1000 kPa) com frequência de 0,1 Hz.

### 4.5.1 Grupo baixa tensão normal (100 kPa) e frequência 0,1 Hz.

#### 4.5.1.1 Cisalhamento cíclico x deslocamento cisalhante

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios para amostras com JRC baixo (10-14) e alto (14-18). Todos os ensaios foram realizados com tensão cisalhante constante de 26 kPa.

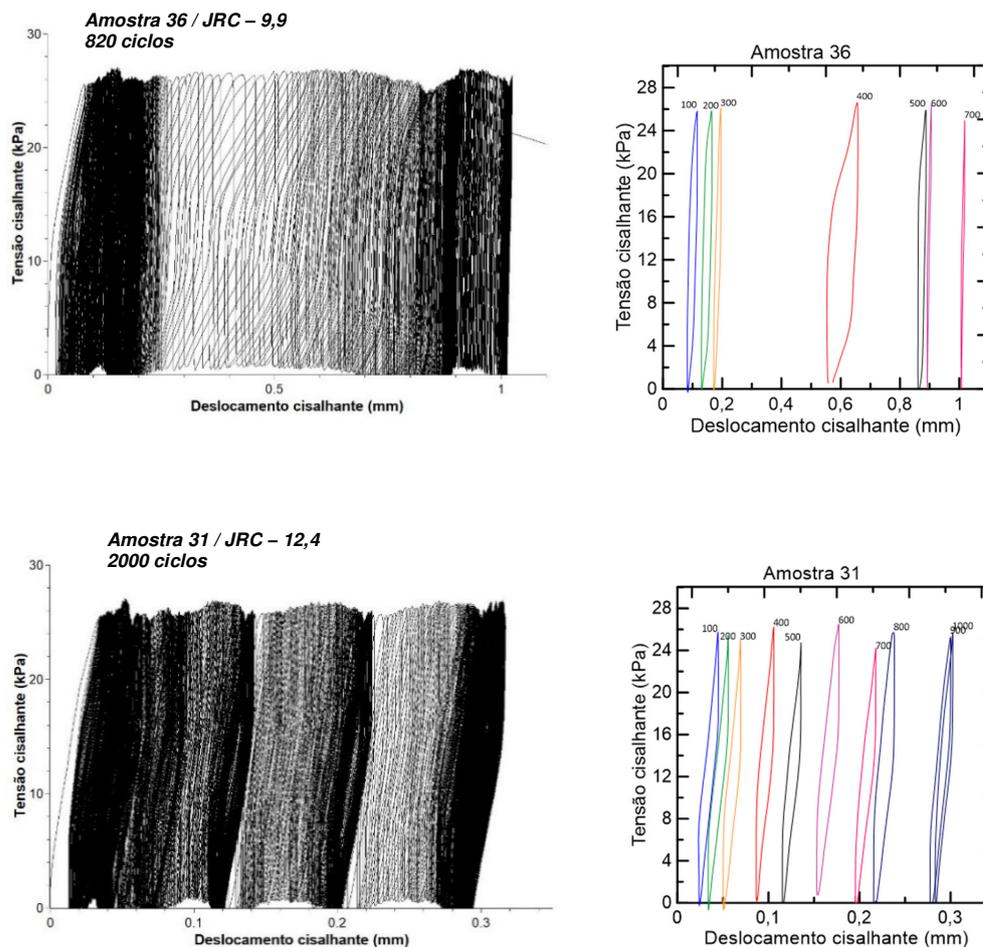


Figura 4.5 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras com JRC baixo (10-14).

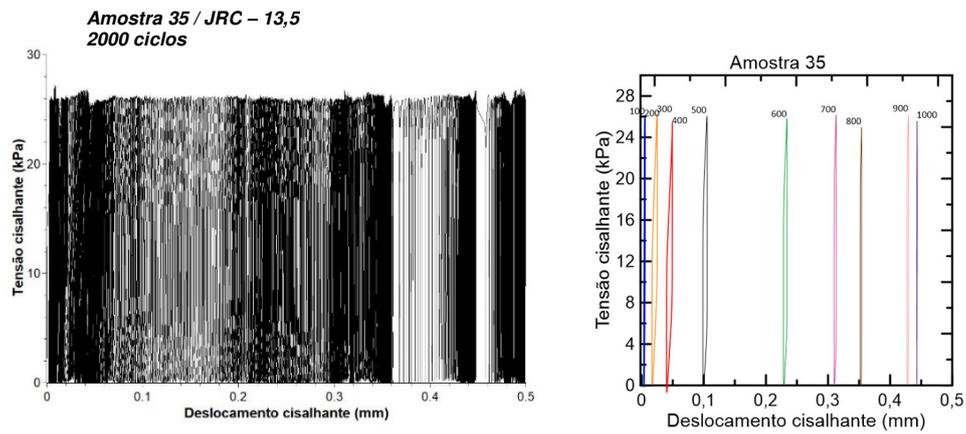


Figura 4.6 – Gráfico do ensaio de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC baixo (10-14).

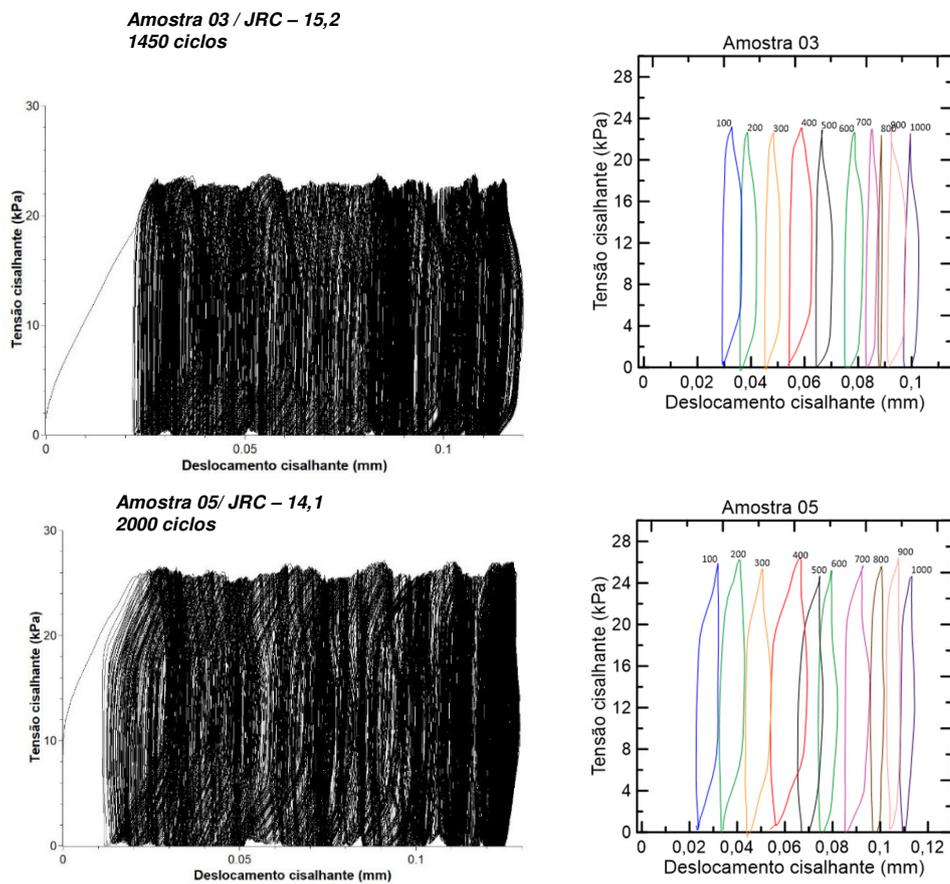


Figura 4.7 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC alto (14-18).

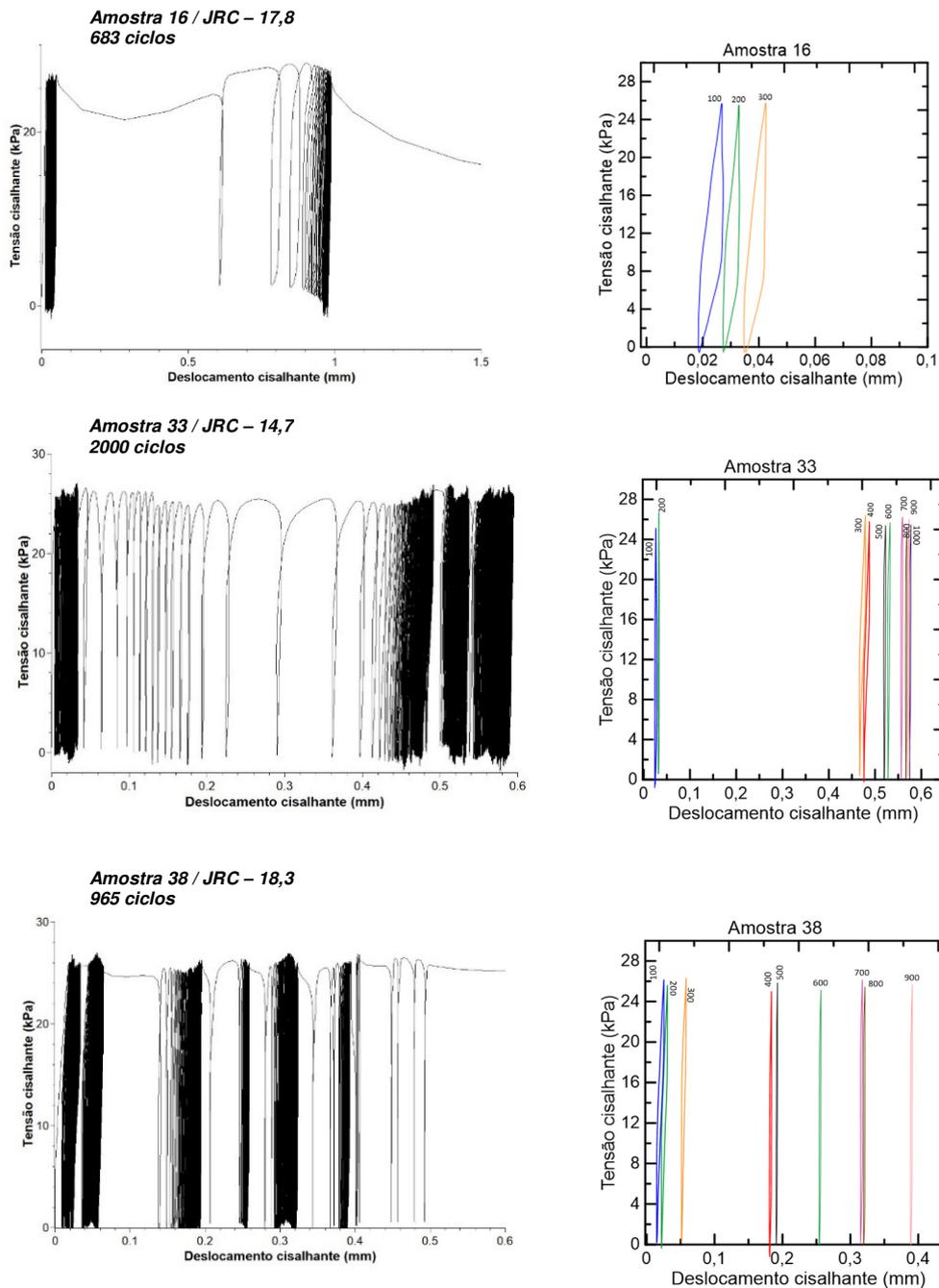


Figura 4.8 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC alto (14-18).

As Figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 mostram o deslocamento cisalhante das amostras com tensão normal baixa (100 kPa) para dois grupos de JRC, além dos ciclos de histerese de números 100 a 1000 variando de 100 em 100 ciclos, quando possíveis. O cisalhamento cíclico leva ao fechamento das juntas que pode aumentar a resistência ao cisalhamento e também leva à degradação da rugosidade que pode diminuir a resistência (Kou *et al.* 2019). Durante os ciclos de cisalhamento

ocorreram períodos de maiores e menores deslocamentos gerando intercalações de áreas claras e escuras nos gráficos de deslocamento cisalhante por tensão cisalhante. Esse comportamento se deve ao deslizamento da descontinuidade por pontos mais resistentes que quando rompem ou quebram produzem deslocamentos acumulados irreversíveis ao longo dos ciclos. Os deslocamentos acumulados tiveram uma média de 0,3 mm para amostras que finalizaram o ensaio em 2000 ciclos e para as amostras que romperam antes da finalização a média foi de 0,8 mm. O comportamento das amostras que romperam antes da finalização do ensaio parece estar relacionado com o tipo da rugosidade. As amostras 16 e 38, que romperam com baixo número de ciclos (680 e 965), possuem altos valores de JRC com rugosidade bem acentuada.

Fathi *et al.* (2016) concluíram que a partir de 100 ciclos os pontos mais acentuados da rugosidade são afetados por um comportamento de fadiga para réplicas de amostras fraturadas. Para materiais rochosos, como as rochas gnáissicas, são levados em consideração os diferentes tipos de minerais na superfície da fratura que compõem uma variedade de pontos com durezas maiores e menores modificando o comportamento do cisalhamento ao longo dos ciclos. Minerais com dureza baixa são mais propícios a serem triturados e minerais mais resistentes são desgastados (Figuras 4.17, 4.18 e 4.19).

A variação da área dos ciclos de histerese em relação ao aumento do número de ciclos mostra que pontos de maior resistência possuem ciclos com menores áreas e, portanto, pouca capacidade de dissipação de energia. Pontos em que ocorre um aumento da área são pontos de maior dissipação de energia, causando maiores deslocamentos, quebra ou desgaste da rugosidade. As áreas dos ciclos de histerese variaram de 0,00001 a 0,001 kNmm. Os ciclos de histerese mostraram que mesmo para um trecho do ensaio com grandes quantidades de ciclos (área escura), a amostra continua deslocando de forma constante, com ciclos aproximadamente paralelos, com pouca inclinação, pouca influência da rigidez, sendo um indicativo de que a tensão cisalhante de pré-pico, baixa tensão normal e a frequência utilizada são suficientes para causar deslocamentos acumulados irreversíveis de pequenos blocos.

#### 4.5.1.2 Deslocamento acumulado e abertura hidráulica

A seguir são apresentados os resultados do deslocamento acumulado e abertura hidráulica dos dois grupos de amostras.

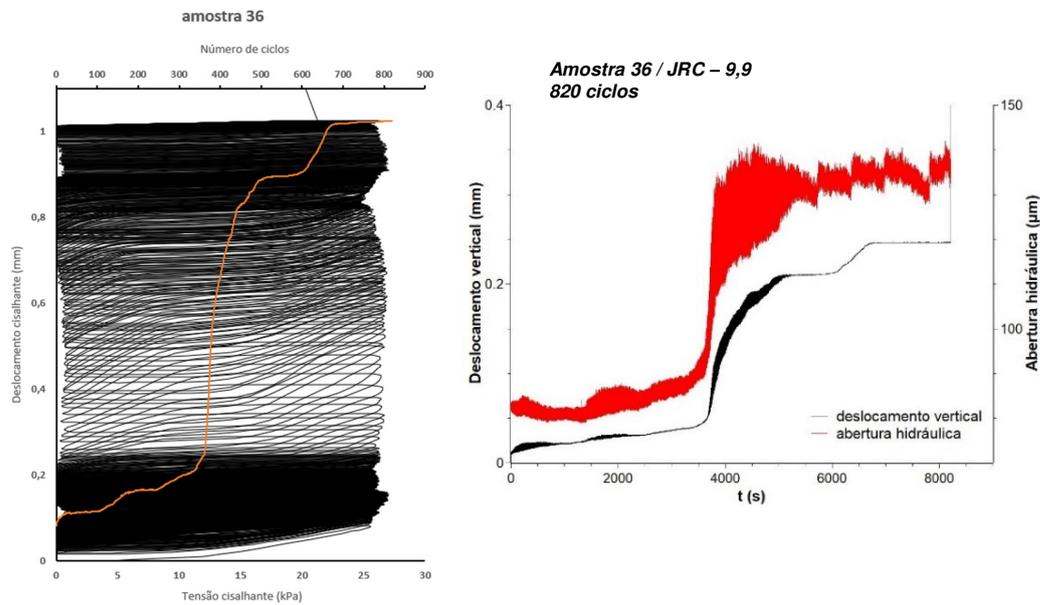


Figura 4.9 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 36.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

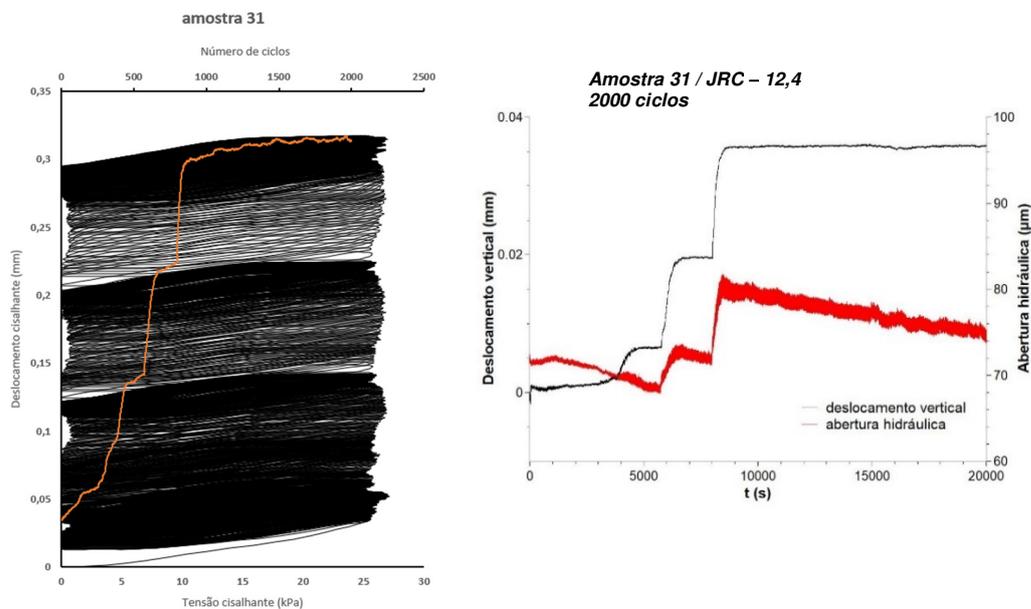


Figura 4.10 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 31.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

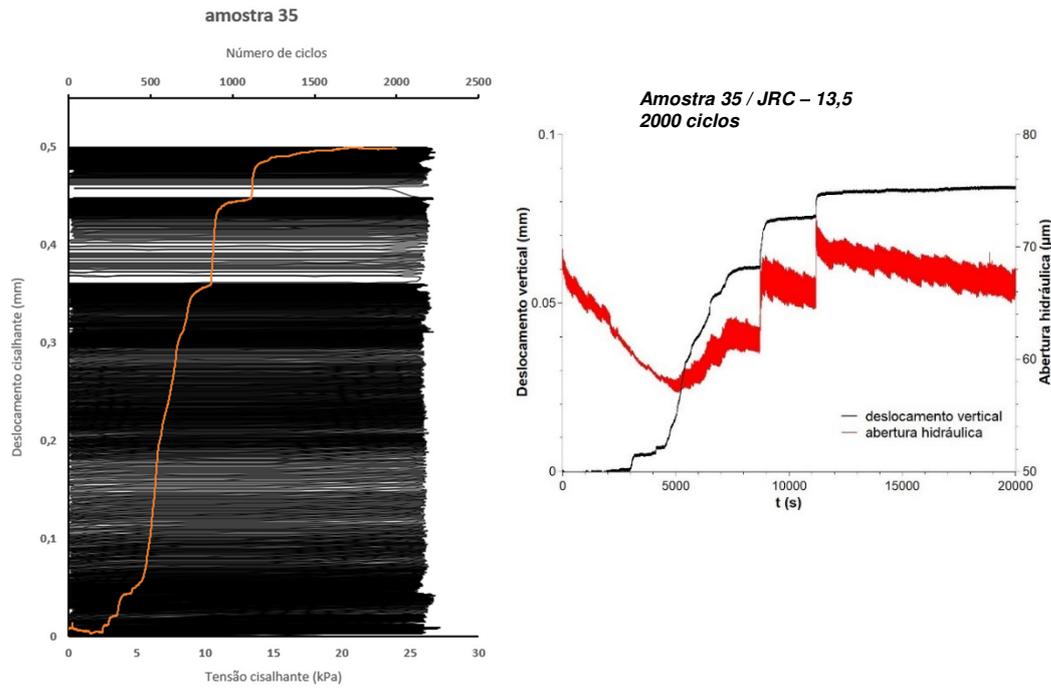


Figura 4.11 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 35.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

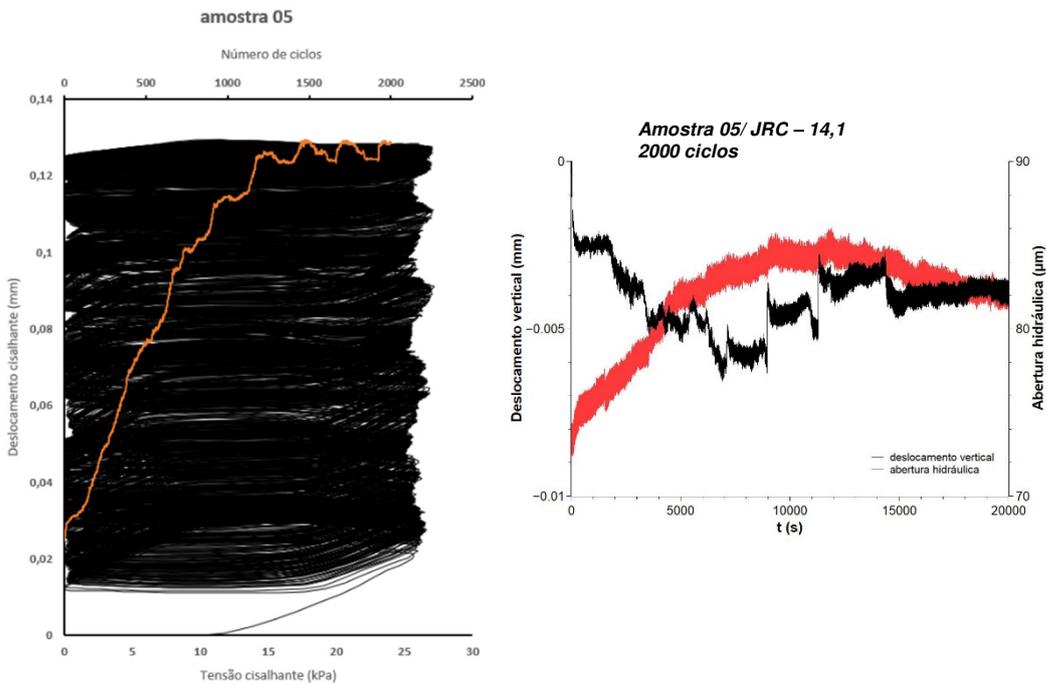


Figura 4.12 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 05.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

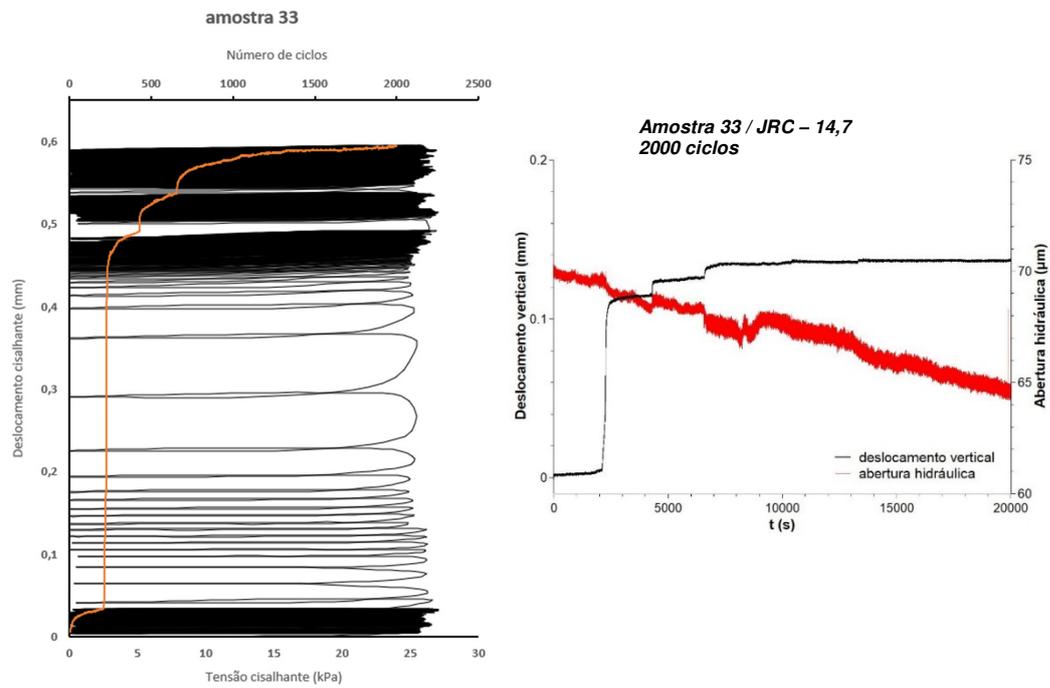


Figura 4.13 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 33.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

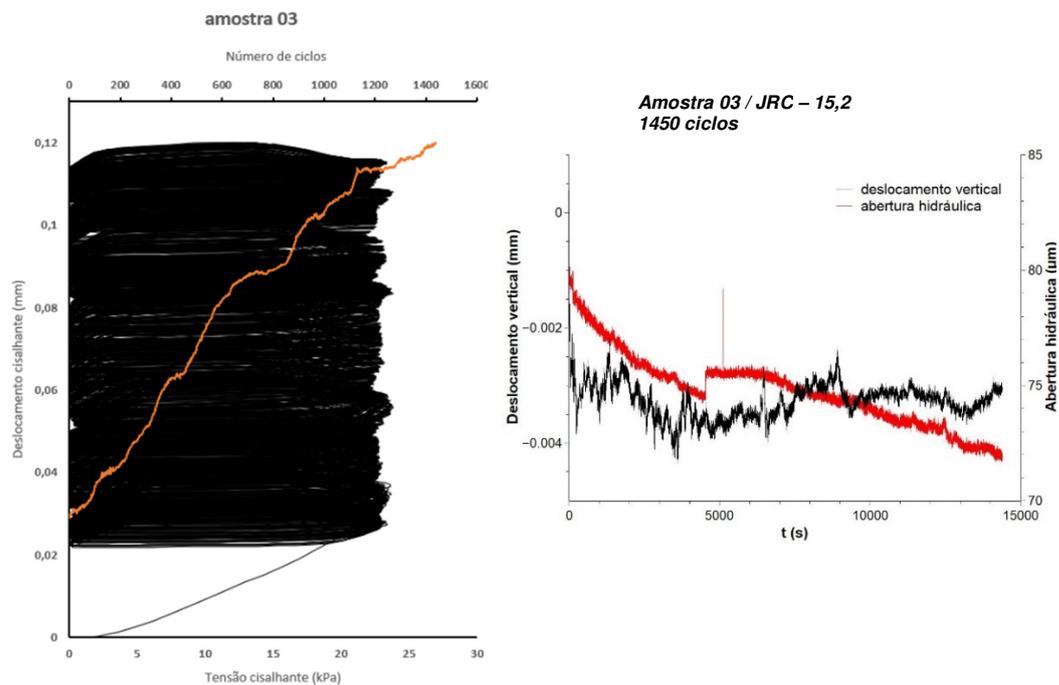


Figura 4.14 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 03.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

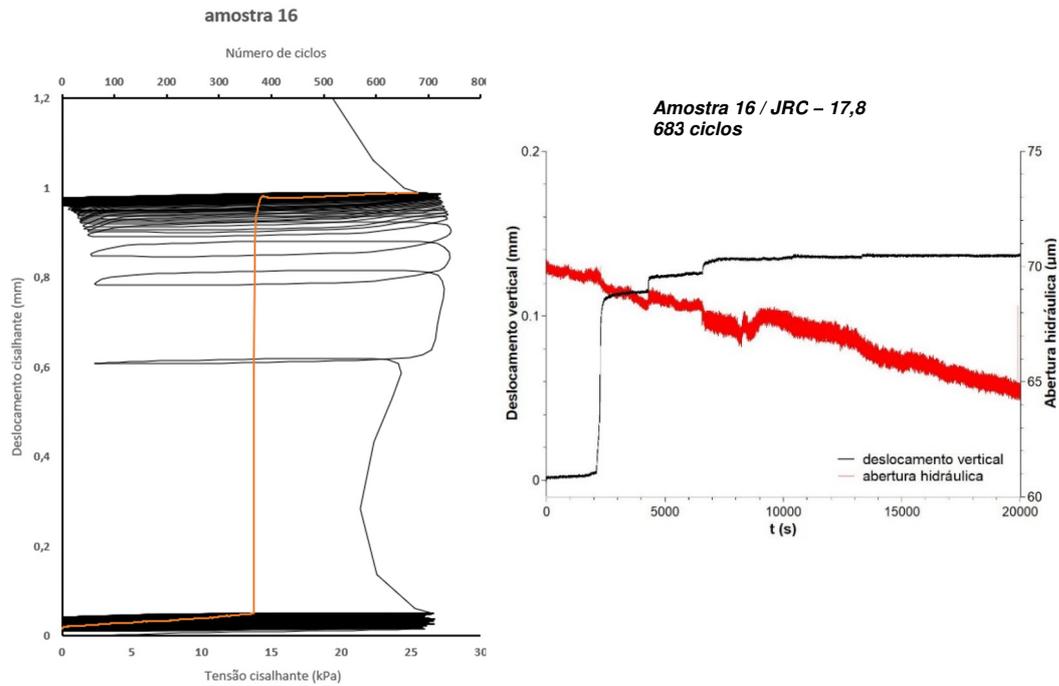


Figura 4.15 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 16.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

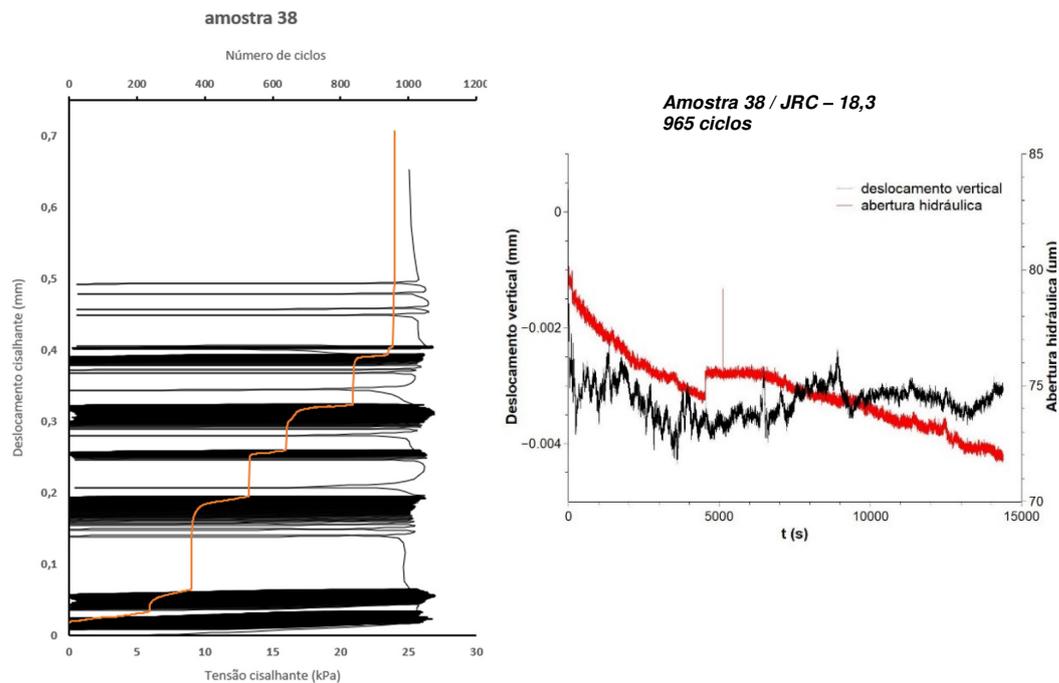


Figura 4.16 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica versus deslocamento vertical em função do tempo para amostra 38.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

As Figuras 4.9 a 4.16 ilustram uma comparação entre a amplitude máxima do deslocamento cisalhante pelo número de ciclos versus os gráficos de cisalhamento cíclico com eixos trocados para facilitar a interpretação dos resultados e os gráficos de abertura hidráulica e deslocamento vertical.

Inicialmente, a maioria das amostras apresenta um deslocamento máximo inicial entre 0,01 a 0,02 mm que corresponde à contração das juntas e o aumento da área de contato da junta (Fathi *et al.* 2016). Esse comportamento faz com que a abertura hidráulica diminua e volte a subir à medida que o deslocamento aumenta.

A linha do deslocamento máximo acumulado mostra que mesmo para as áreas escuras em que a resistência é maior, há deslocamento constante e crescente e, portanto, a amostra continua a avançar e não fica parada no mesmo ponto. À medida que a amostra sofre desgaste nas áreas escuras, ocorre saltos no deslocamento evidenciado pelas áreas de maior amplitude no deslocamento. As amostras 16 e 38 apresentaram diversos pontos com altas amplitudes de deslocamentos que geraram os maiores deslocamentos acumulados, abertura da fratura e finalização do ensaio antes dos 2000 ciclos. Os deslocamentos máximos acumulados foram maiores antes dos 1000 ciclos e após 1000 ciclos os deslocamentos se tornaram menores devido à resistência da junta, porém ainda crescentes como notado na inclinação da linha de amplitude máxima do deslocamento.

A abertura hidráulica acompanha o deslocamento máximo acumulado e reflete o deslocamento vertical com a variação da rugosidade. O grupo de amostras com alto e baixo valor de JRC apresentou uma média da abertura hidráulica de 70  $\mu\text{m}$  durante o ensaio. O comportamento da abertura hidráulica para amostras com JRC baixo foi linear e acompanhou o deslocamento vertical. Para amostras com JRC alto a abertura hidráulica foi decrescente e linear. Segundo lee *et al.* (2002) a tendência decrescente da abertura hidráulica pode estar relacionada com a rugosidade, baixa tensão normal aplicada e o efeito da dilatação e produção de goivagem (material fino) por degradação da junta.

#### 4.5.1.3 Corpo de prova após o ensaio

A seguir são apresentadas as imagens das fraturas após o ensaio de cisalhamento cíclico.

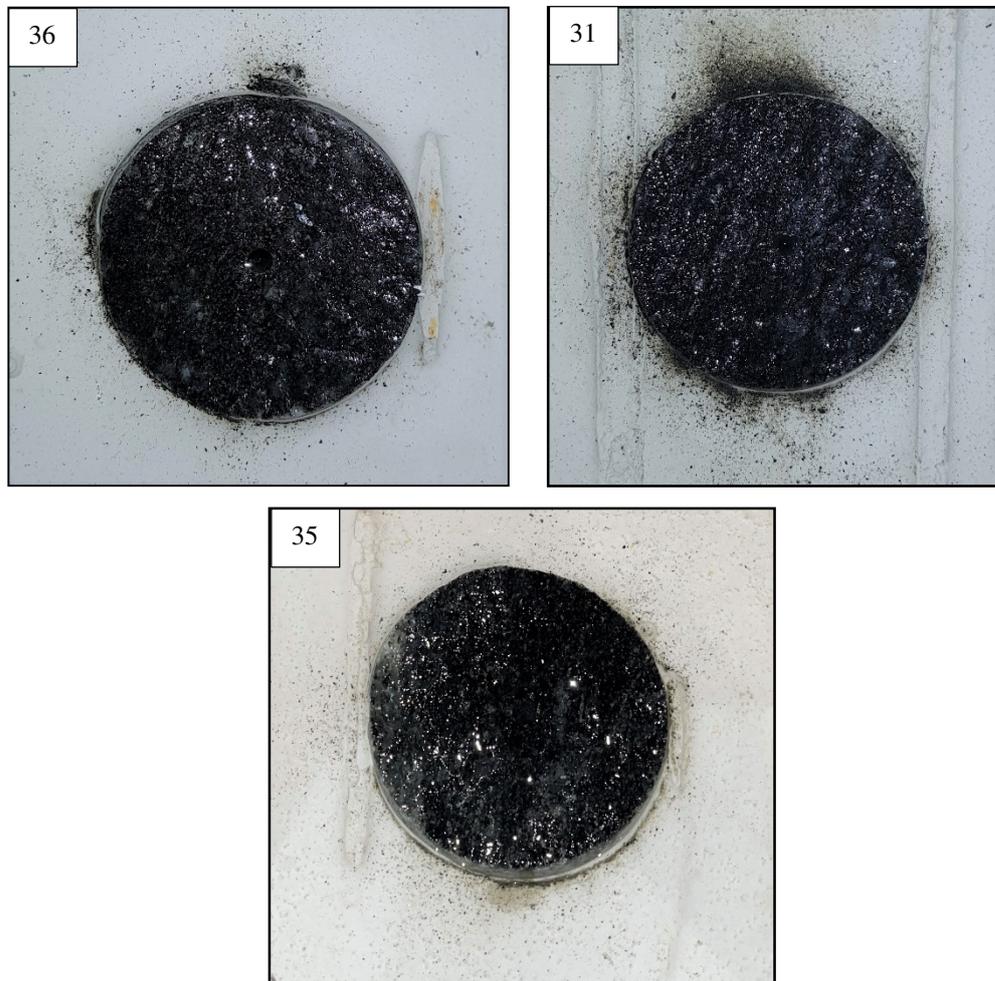


Figura 4.17 – Imagens das fraturas após o ensaio de cisalhamento cíclico para o grupo de amostras com JRC baixo.

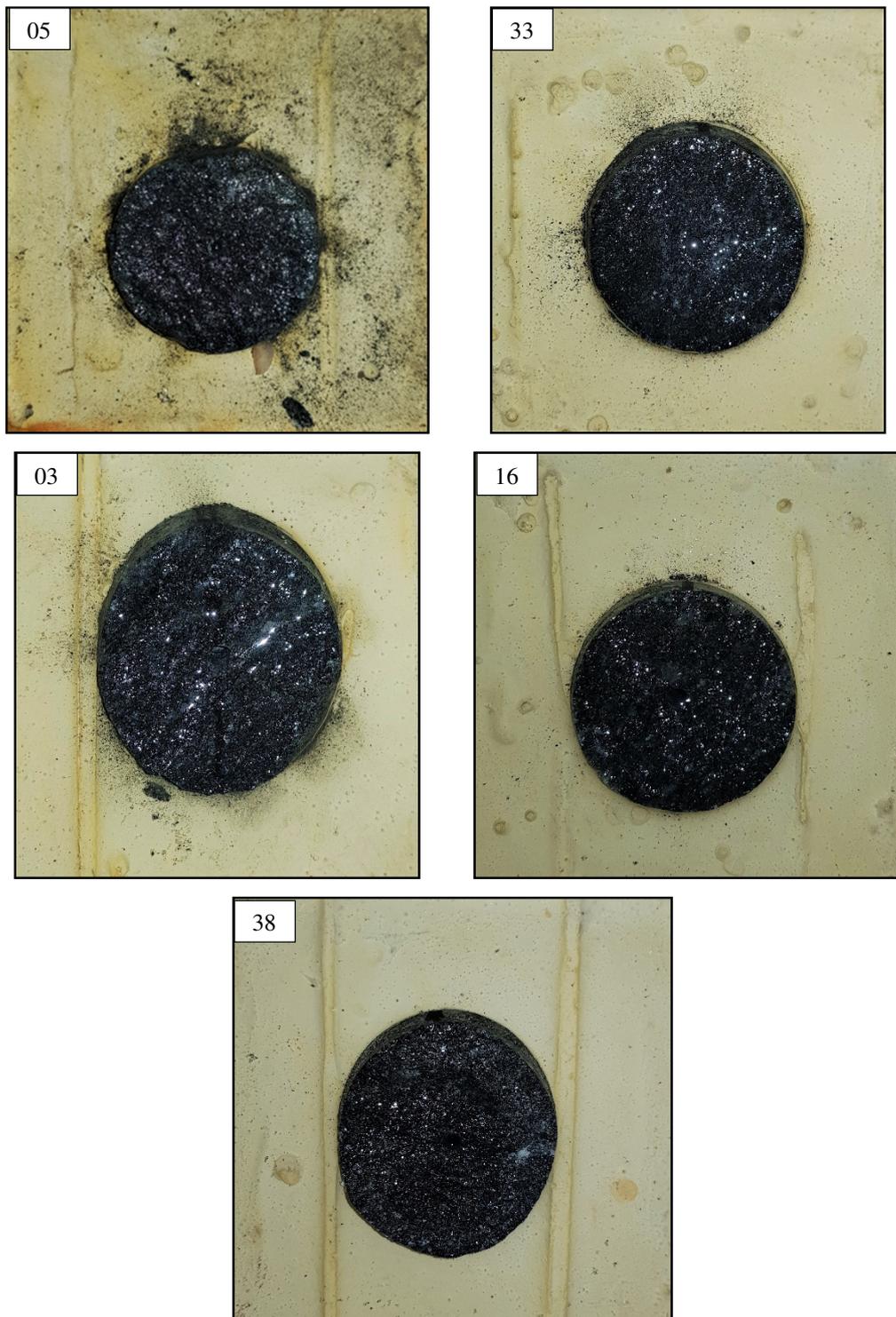


Figura 4.18 – Imagens das fraturas após o ensaio de cisalhamento cíclico para o grupo de amostras com JRC alto.

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram o material cominuído depositado no fundo da caixa de cisalhamento, resultado da abrasão dos minerais durante o processo de cisalhamento cíclico.

A grande parte do material é composto por biotita e muscovita, minerais com baixa dureza e de fácil desgaste. A tabela 10 mostra a estimativa do material depositado com base no cálculo da área da imagem.

Tabela 10 – Estimativa do material cominuído depositado no fundo da caixa.

Amostra	JRC	Material depositado (%)
36	9,9	2,0
31	12,4	7,5
35	13,5	2,1
05	14,1	11,2
33	14,7	2
03	15,2	2,7
16	17,8	1,4
38	18,3	0,5

As amostras 31 e 05 tiveram a maior porcentagem de material depositado, ambas foram ensaiadas em 2000 ciclos. Importante ressaltar que as amostras 36, 05 e 3 tiveram pedaços de rocha quebrados no fundo da caixa. Esse material pode influenciar na abertura hidráulica e na permeabilidade da fratura.

Com base na descrição petrográfica, essas amostras possuem além de minerais micáceo, minerais do grupo da hornblenda que podem se alterar mais facilmente mesmo a rocha sendo sã e quase sempre aparecem em contato com biotita e muscovita. Além disso, essa rocha estava próxima de um contato com dique de fonolito, sendo uma rocha intensamente deformada.

As amostras 16 e 38 apresentaram a menor porcentagem de material depositado, influenciado pela baixa quantidade de ciclos (rompimento antes dos 2000 ciclos) e material micáceo nas juntas.

A Figura 4.19 ilustra as fraturas antes e depois do ensaio de cisalhamento cíclico para as amostras 36, 05 e 38. É possível notar as ranhuras (áreas afetadas durante o cisalhamento) deixadas pelo cisalhamento com base no aumento da área branca. Isso permite identificar e estimar possíveis áreas mais afetadas durante o

cisalhamento cíclico. As áreas brancas correspondem a minerais de quartzo e feldspato, minerais mais resistentes à quebra, contudo, a amostra pode quebrar nos planos de fraqueza como indicado na imagem.

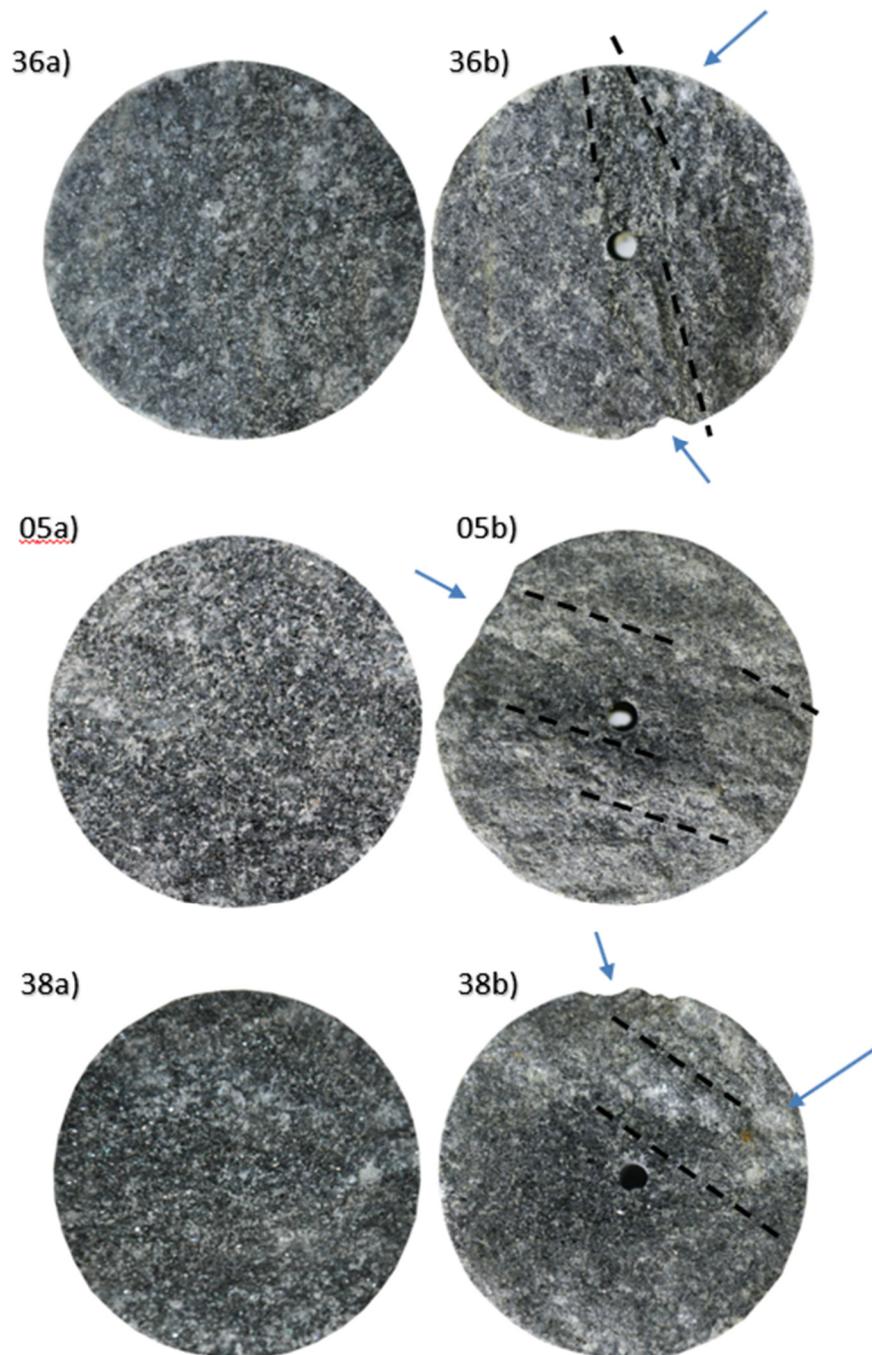


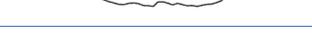
Figura 4.19 – Imagens da fratura antes (a) e após (b) o ensaio de cisalhamento cíclico para as amostras 36, 05 e 38.

O aumento da área branca pode indicar áreas de maior desgaste nos minerais mais resistentes e o aumento de áreas escuras está relacionado com a quebra de minerais micáceos. A amostra 36b apresenta poucas áreas brancas, porém apresenta áreas cisalhadas com grande quantidade de material micáceo, indicado pela linha preta tracejada. A amostra 05b apresenta ranhuras indicadas pela linha tracejada e amostra 38b apresenta um aumento da área branca nas laterais da fratura indicando o desgaste ocasionado pelo cisalhamento.

A Tabela 11 apresenta os valores de JRC antes e depois do ensaio de cisalhamento cíclico. Verifica-se que o processo de cisalhamento nem sempre produz alteração ou redução do valor de JRC. A modificação da superfície da junta pode aumentar o valor de JRC em relação ao medido antes do ensaio.

O cisalhamento cíclico causa o desgaste da rugosidade e em alguns casos a quebra das irregularidades, alterando o perfil bidimensional utilizado para medir o JRC, podendo aumentar o valor medido inicialmente.

Tabela 11 – JRC antes e depois do ensaio de cisalhamento cíclico.

Amostra	JRC antes		JRC depois		Perfilômetro (depois)
	Z <sub>2</sub>	R <sub>p</sub>	Z <sub>2</sub>	R <sub>p</sub>	
<b>31</b>	12,4	13,1	15,7	16,2	
<b>35</b>	13,5	14,1	12,4	13,1	
<b>36</b>	9,9	10,4	14,0	14,5	
<b>05</b>	14,1	14,8	14,6	15,1	
<b>03</b>	15,2	15,2	18,2	18,1	
<b>16</b>	17,8	17,8	17,3	17,4	
<b>33</b>	14,7	14,3	15,0	15,6	
<b>38</b>	18,3	18,1	18,5	18,1	

## 4.5.2 Grupo baixa tensão normal (100 kPa) e frequência 0,01 Hz.

### 4.5.2.1 Cisalhamento cíclico x deslocamento cisalhante

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios para amostras com JRC baixo (13,4) e alto (16,0). Os dois ensaios foram realizados com tensão cisalhante constante de 26 kPa. A Figura 4.20 mostra o deslocamento cisalhante das amostras com tensão normal baixa (100 kPa) e variação de JRC para uma frequência 0,01 Hz, além dos ciclos de Histerese de números 10 a 100 variando de 10 em 10 ciclos.

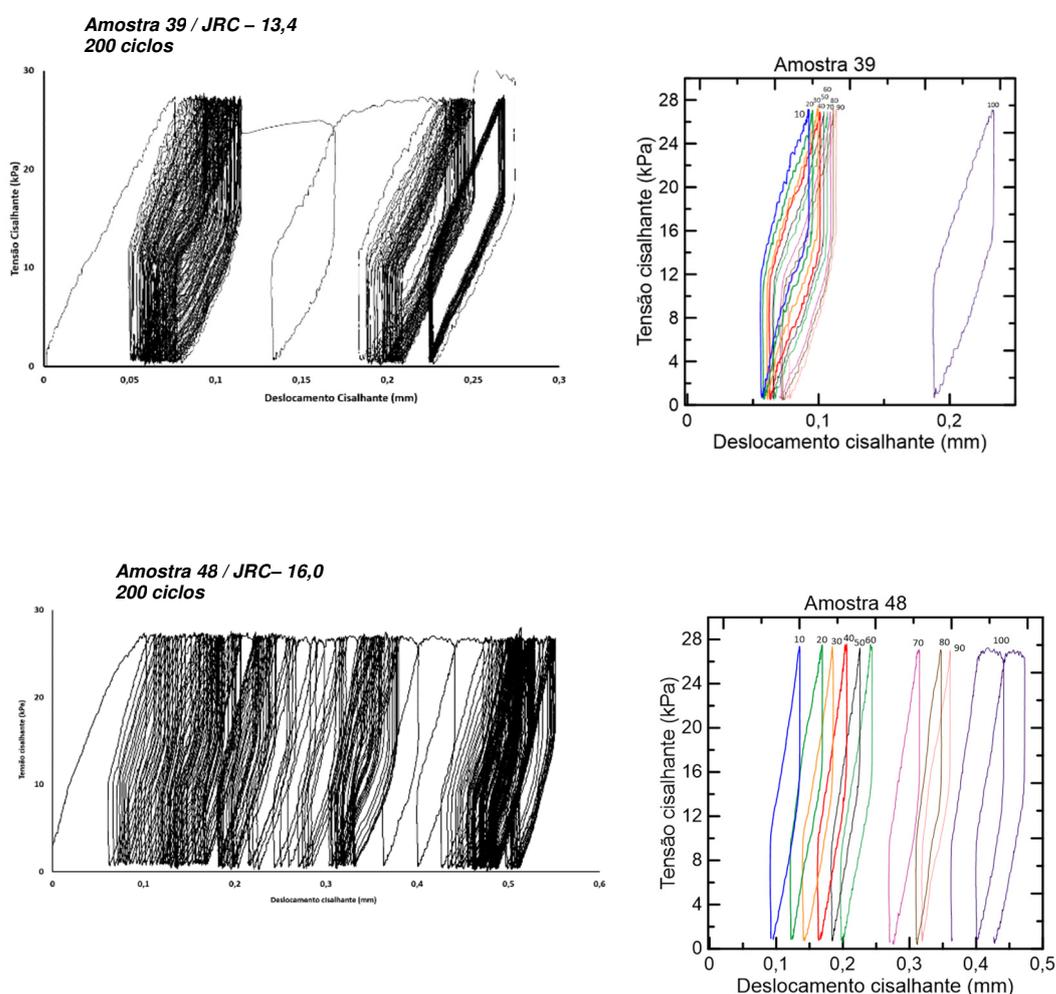


Figura 4.20 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC alto (14-18).

As duas amostras possuem rugosidades muito acentuadas de alto ângulo como mostrado na tabela 2. Os deslocamentos acumulados foram 0,21 mm (amostra 39) e 0,51 mm (amostra 48), ambas as amostras finalizaram o ensaio com 200

ciclos. A tensão cisalhante pré-pico, assim como nos ensaios do item anterior, foi suficiente para causar deslocamentos acumulados irreversíveis ao longo dos ciclos.

A variação das áreas dos ciclos de histerese em relação ao aumento do número de ciclos foi de 0,0009 a 0,0013 kNmm, sendo a maior variação encontrada na amostra 39 no ciclo de número 100. Acredita-se que o aumento área representa os pontos de maior dissipação de energia, portanto, pontos de maiores deslocamentos. Os ciclos apresentaram leve distorção, pouca influência da rigidez, apresentando deslocamento constante, mesmo para áreas com grande quantidade de ciclos. A mesma tendência foi observada quando a frequência era de 0,1 Hz.

#### 4.5.2.1 Deslocamento acumulado e abertura hidráulica

A seguir são apresentados os resultados do deslocamento acumulado e abertura hidráulica das amostras. As Figuras 4.21 e 4.22 ilustram uma comparação entre a amplitude máxima do deslocamento cisalhante pelo número de ciclos e os gráficos de cisalhamento cíclico com eixos trocados para facilitar a interpretação dos resultados, e os gráficos de abertura hidráulica e deslocamento vertical.

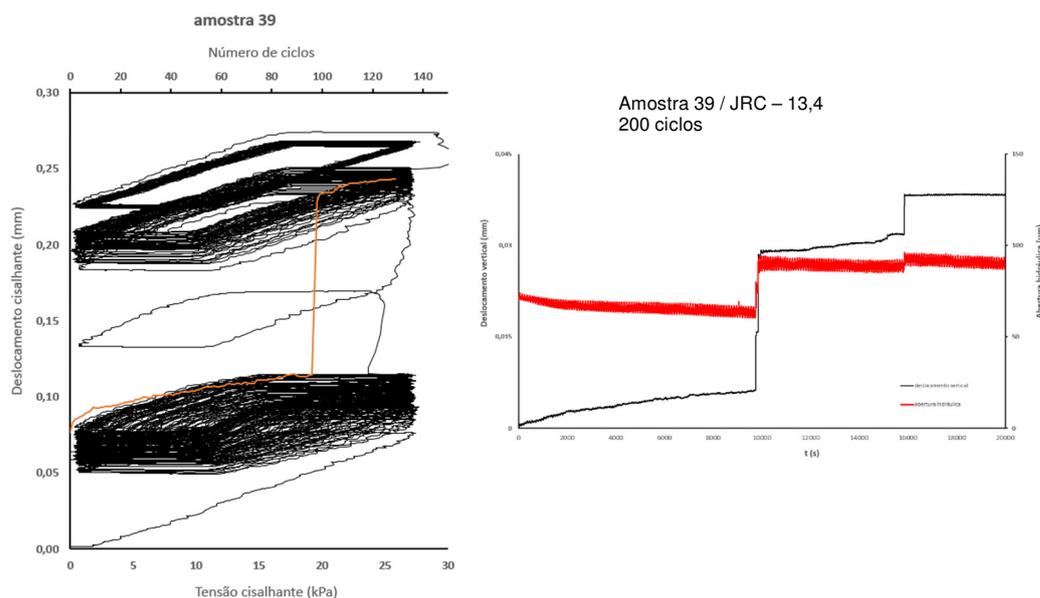


Figura 4.21 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 39.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

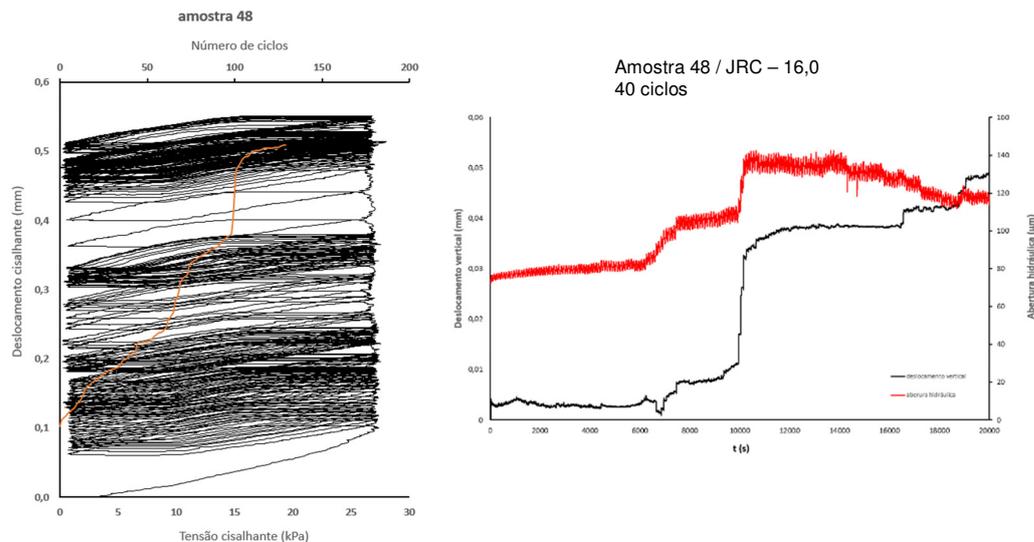


Figura 4.22 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 48.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

Inicialmente, as amostras apresentam um deslocamento máximo inicial de 0,07 mm (amostra 39) e 0,1 mm (amostra 48). Esse deslocamento corresponde ao fechamento da junta. O aumento do deslocamento inicial em comparação com as amostras do item anterior pode estar relacionado com o JRC alto e a baixa velocidade do cisalhamento.

A linha do deslocamento máximo acumulado mostra uma tendência de aumento constante dos deslocamentos, mesmo para uma área de maior resistência. Amplitudes máximas de deslocamento ocorreram nos dois ensaios e são elas que favorecem o rompimento da amostra. O mesmo comportamento foi observado na frequência de 0,1 Hz. As duas amostras mostraram um aumento linear do deslocamento vertical, favorecido pelo JRC alto e alto ângulo das rugosidades.

Os valores da abertura hidráulica para a amostra 39, JRC baixo, foi de aproximadamente 90  $\mu\text{m}$ , já para a amostra 41, JRC alto, a abertura hidráulica foi de aproximadamente 120  $\mu\text{m}$ . Esse comportamento difere do comportamento do item anterior, devido às amostras possuírem JRC alto com alto ângulo da rugosidade, desfavorecendo o fechamento da amostra. A abertura hidráulica acompanhou o deslocamento vertical e os deslocamentos máximos cisalhantes para as duas amostras durante os ciclos.

#### 4.5.2.2 Corpo de prova após o ensaio

A seguir são apresentadas as imagens das fraturas após o ensaio de cisalhamento cíclico. A Figura 4.23 mostra o material cominuído depositado no fundo da caixa de cisalhamento, resultado da abrasão dos minerais durante o processo de cisalhamento cíclico.

A tabela 12 mostra a estimativa do material depositado com base no cálculo da imagem.

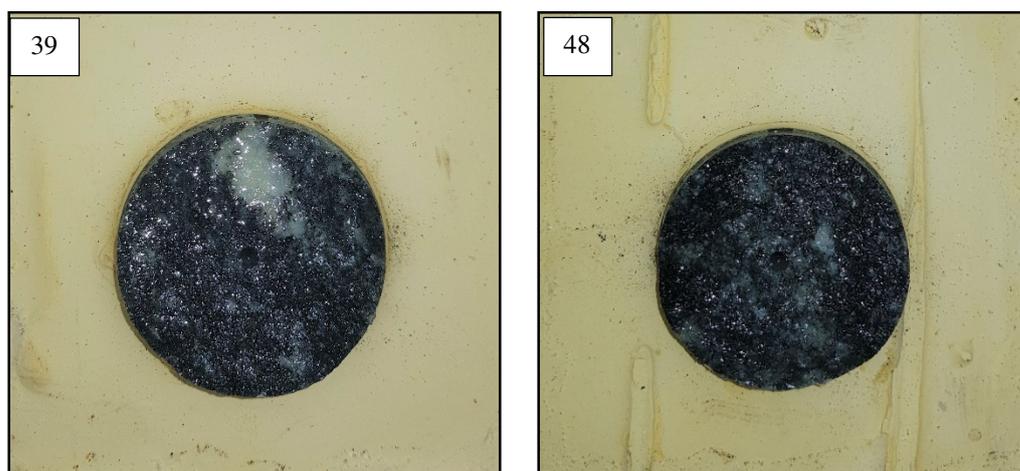


Figura 4.23 – Imagens das fraturas após o ensaio de cisalhamento cíclico para as amostras 39 (JRC baixo) e 41 (JRC alto).

Tabela 12 – Estimativa em porcentagem do material cominuído depositado no fundo da caixa.

Amostra	JRC	Material depositado (%)
39	13,4	0,1
48	16,0	0,4

Apesar da grande quantidade de minerais micáceos na superfície das fraturas, as amostras 39 e 41 apresentaram pouco material depositado, sendo fruto do baixo número de ciclos realizados. Comparando com os resultados do item 4.5.1, as amostras com maior valor de JRC tendem a produzir pouco material depositado no fundo da caixa. Esse comportamento pode estar relacionado com o baixo nível de tensão normal e a influência do JRC na resistência ao cisalhamento para pouco número de ciclos.

A Figura 4.24 ilustra as fraturas antes e depois do ensaio de cisalhamento cíclico.

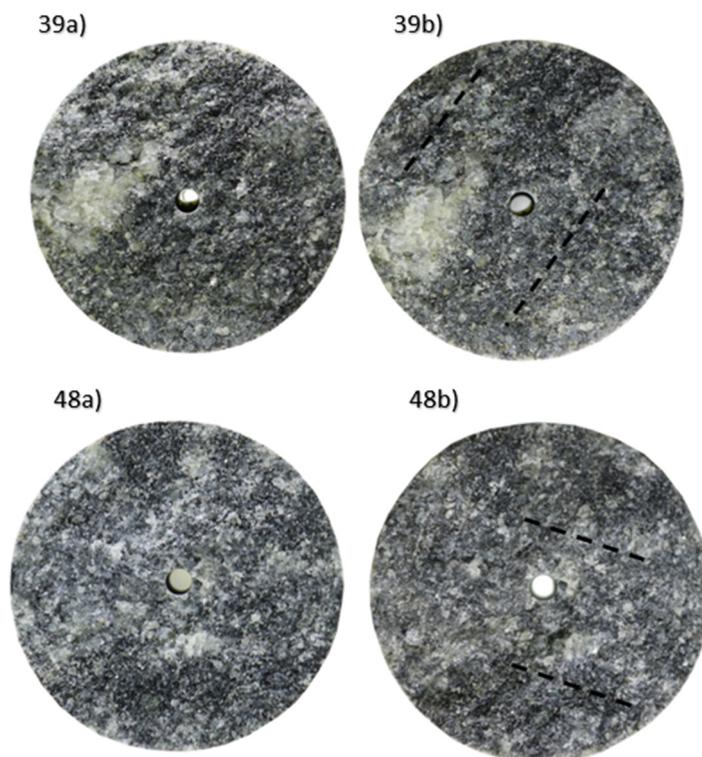


Figura 4.24 – Imagens da fratura antes (a) e após (b) o ensaio de cisalhamento cíclico para as amostras 39 (JRC baixo) e 48 (JRC alto).

Não foram identificadas muitas ranhuras nas fraturas, fato que pode estar relacionado com a diminuição da frequência do ensaio. Poucas áreas brancas foram geradas para tentar uma estimativa dos maiores pontos de desgaste.

Ensaio com frequência mais baixa parece favorecer um contato menor entre as juntas devido à baixa velocidade e baixa quebra dos minerais.

A Tabela 13 apresenta os valores de JRC antes e depois do ensaio de cisalhamento cíclico. Verifica-se que o processo de cisalhamento causou uma redução no valor de JRC.

Tabela 13 – JRC antes e depois do ensaio de cisalhamento cíclico.

Amostra	JRC antes		JRC depois		Perfilômetro (depois)
	Z <sub>2</sub>	R <sub>P</sub>	Z <sub>2</sub>	R <sub>P</sub>	
39	13,4	14,0	11,7	12,4	
48	16,0	15,9	14,9	15,4	

### 4.5.3 Grupo alta tensão normal (1000 kPa) e frequência 0,1 Hz.

#### 4.5.3.1 Cisalhamento cíclico x deslocamento cisalhante

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios para amostras com JRC baixo (10-14) e alto (14-18). Todos os ensaios foram realizados com tensão cisalhante constante de 326 kPa. As Figuras 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28 mostraram o deslocamento cisalhante das amostras com tensão normal alta (1000 kPa) e variação de JRC, além dos ciclos de Histerese de números 100, 500, 1000 e 1900 ciclos.

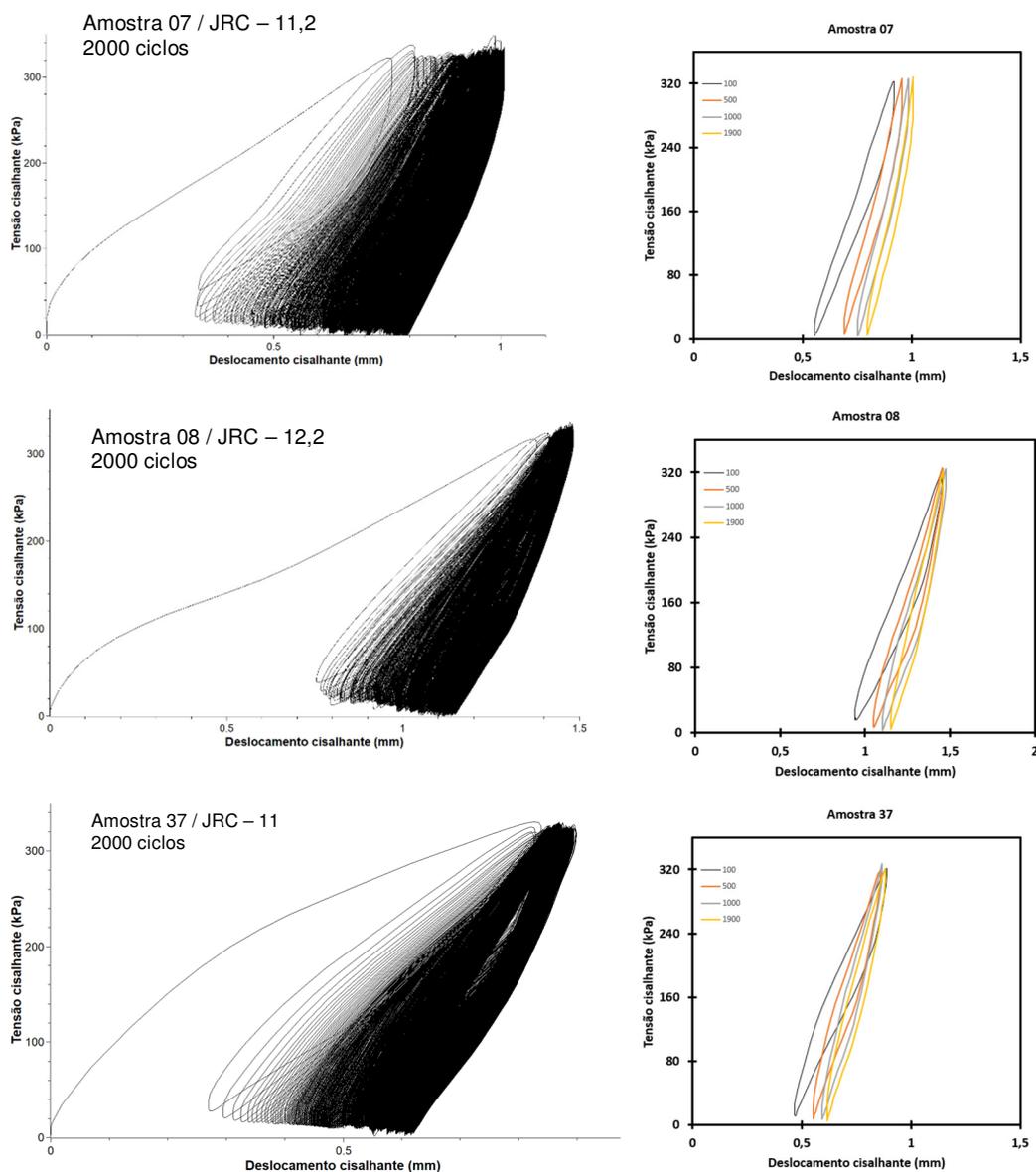


Figura 4.25 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC baixo (14-18).

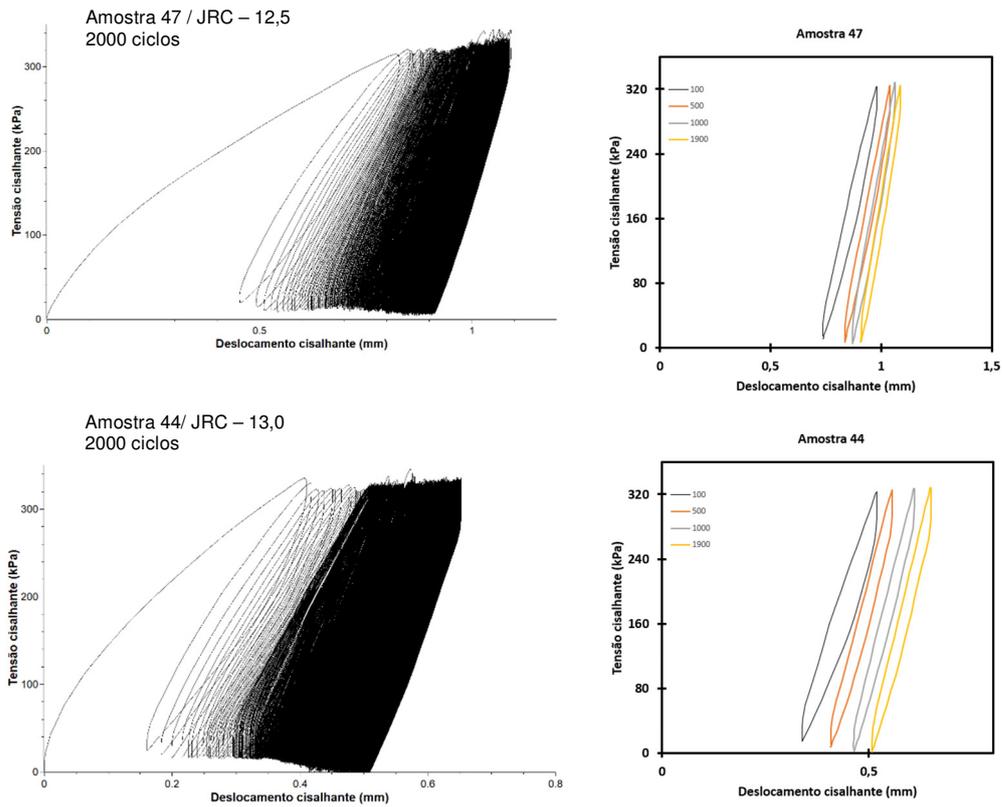


Figura 4.26 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC baixo (14-18).

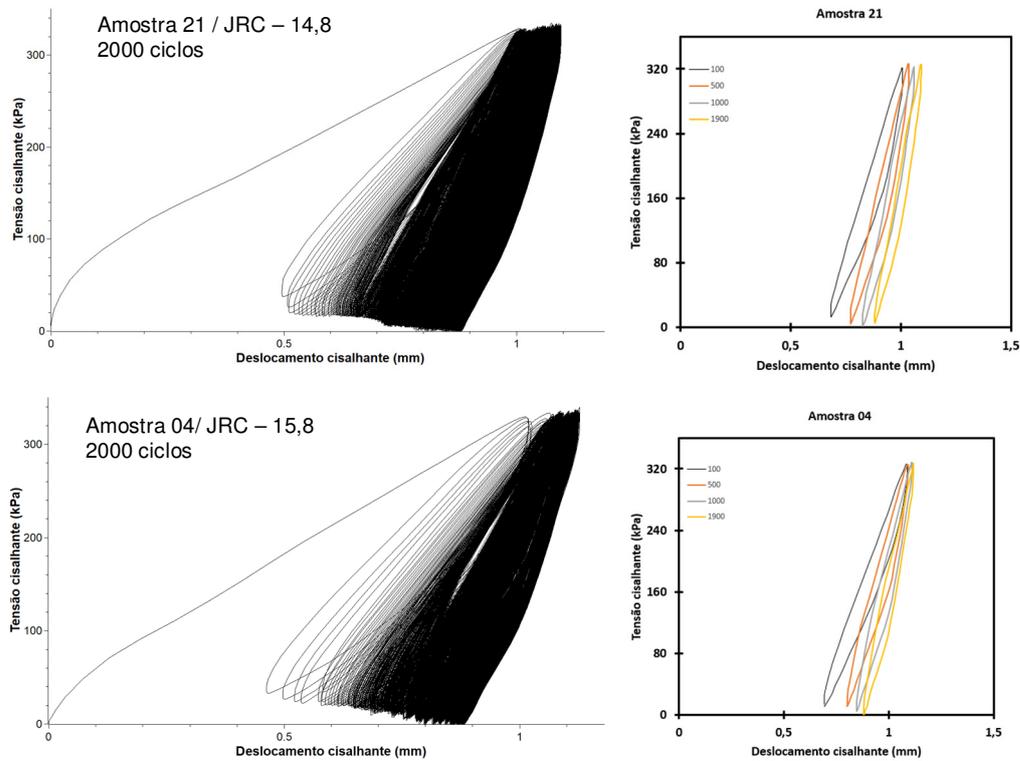


Figura 4.27 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC baixo (14-18).

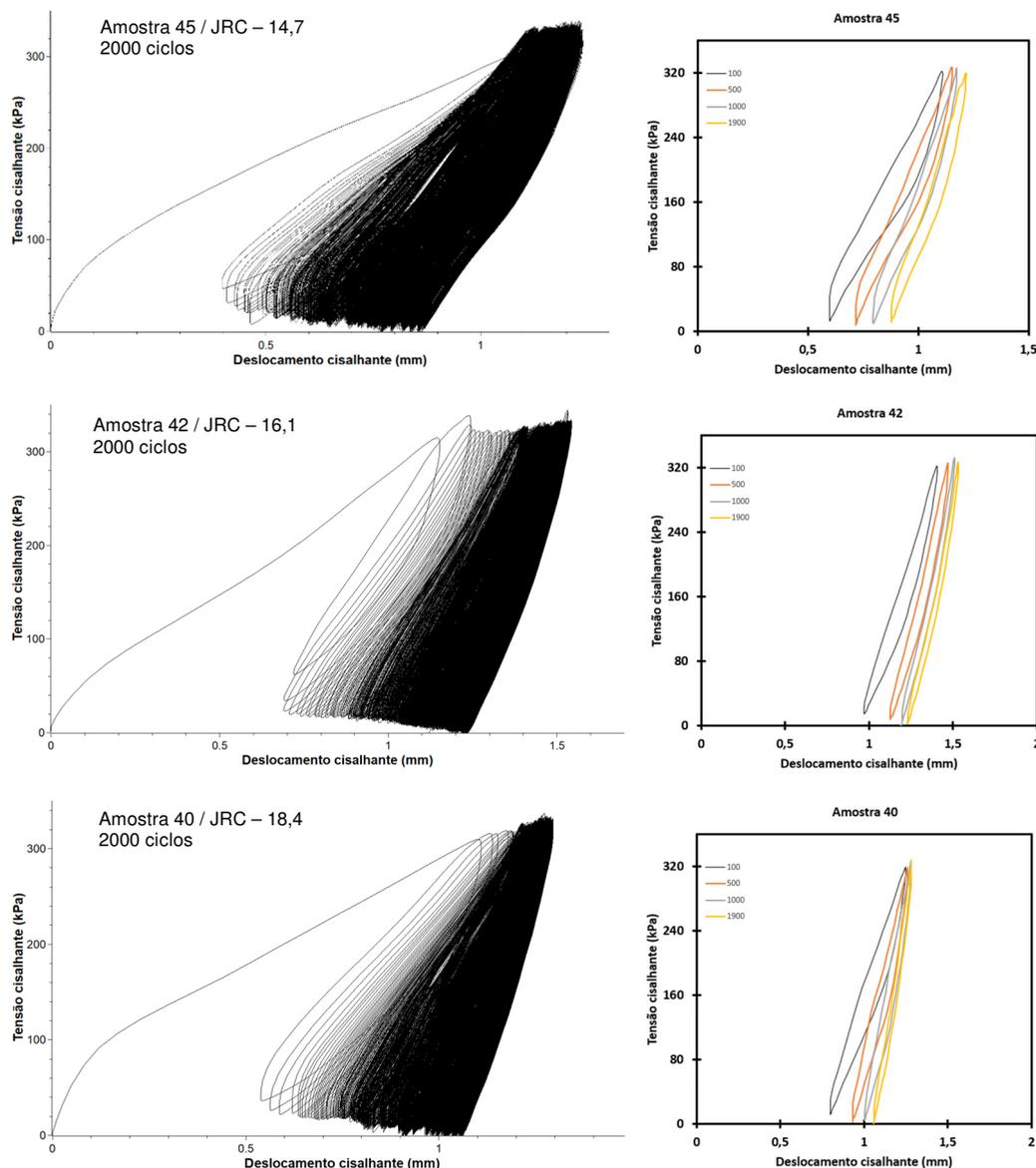


Figura 4.28 – Gráficos dos ensaios de cisalhamento cíclico e ciclos de histerese do grupo de amostras JRC baixo (14-18).

Diferentemente dos ensaios com tensão normal baixa, os ensaios com tensão normal alta geraram uma resistência muito maior na junta apresentando poucos deslocamentos ao longo dos ciclos. Os deslocamentos acumulados variaram entre 0,7 e 1,2 mm, porém as amplitudes de deslocamento máximo foram pequenas, sendo a maior parte do deslocamento ( $> 0,5$  mm) ocorrida no primeiro ciclo do ensaio e está relacionado com o fechamento da fratura (Figuras 4.29 a 4.38) e rigidez da rugosidade nos primeiros 100 ciclos. As amostras 42 e 40, que possuem os maiores valores de JRC, apresentaram uma maior rigidez em relação às amostras

com JRC baixo, contudo, cabe ressaltar, que uma superfície com grandes quantidades de minerais micáceo pode influenciar no comportamento do cisalhamento. Não houve rompimento de amostras e todos os corpos ensaiados finalizaram com 2000 ciclos.

Os ciclos de histerese dos primeiros 100 ciclos apresentaram áreas que variaram entre 0,016 e 0,094 kNmm. A variação da área foi decrescente para todas os corpos de prova e as maiores variações ocorreram nas amostras 42 (0,044 a 7,76 kNmm) e 40 (0,059 a 0,018 kNmm), que possuem os maiores valores de JRC. Além disso, elas apresentaram as maiores variações na inclinação do ciclo, indicativa do aumento da rigidez. Diferente dos ensaios de baixa tensão normal, os ciclos de histerese para tensão normal alta apresentaram áreas maiores, porém com poucos deslocamentos acumulados, maior distorção angular, indicativo de aumento da rigidez e, portanto, a tensão cisalhante pré-pico, alta tensão normal e a frequência utilizada não parecem ser suficientes para diminuir a resistência ao cisalhamento e causar deslocamentos acumulados de grandes blocos.

### 4.5.3.1 Deslocamento acumulado e abertura hidráulica

A seguir são apresentados os resultados do deslocamento acumulado e abertura hidráulica dos dois grupos de amostras. As Figuras 4.29 a 4.38 ilustram uma comparação entre a amplitude máxima do deslocamento cisalhante pelo número de ciclos e os gráficos de cisalhamento cíclico com eixos trocados para facilitar a interpretação dos resultados, e os gráficos de abertura hidráulica e deslocamento vertical.

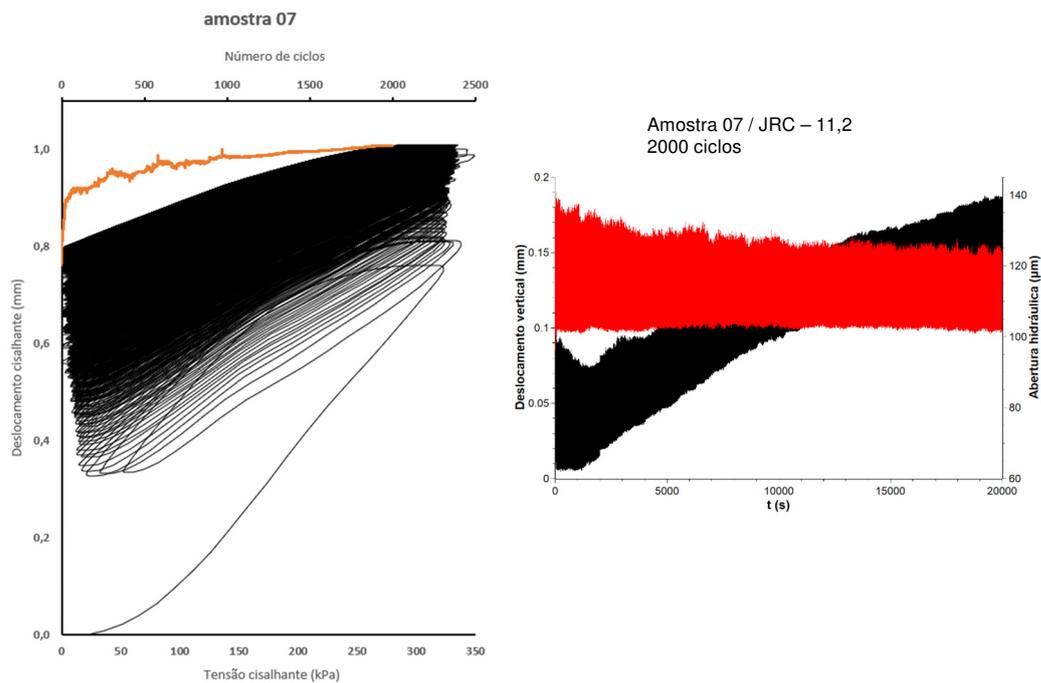


Figura 4.29 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 07.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

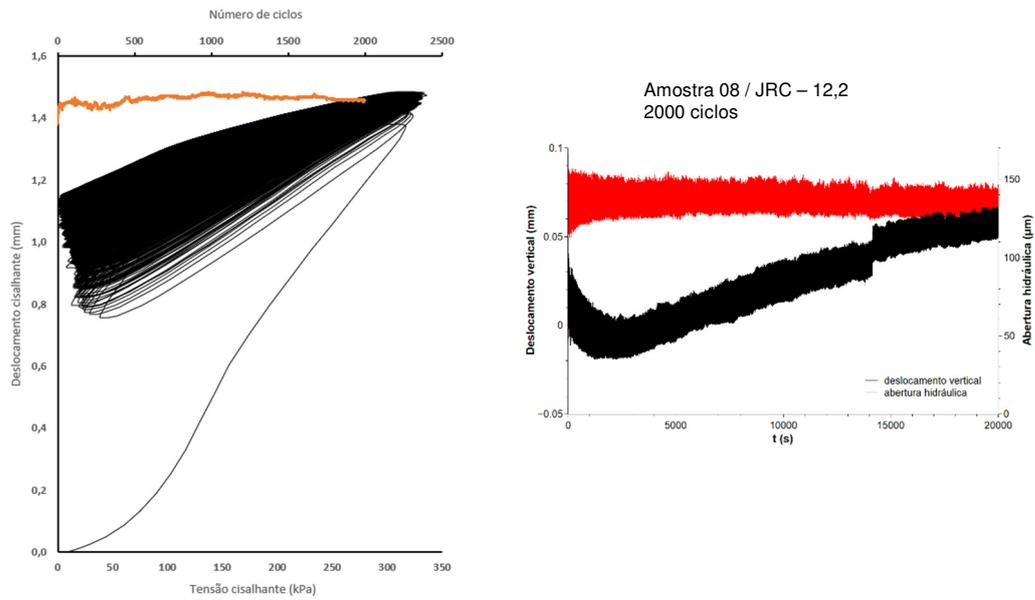


Figura 4.30 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 08.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

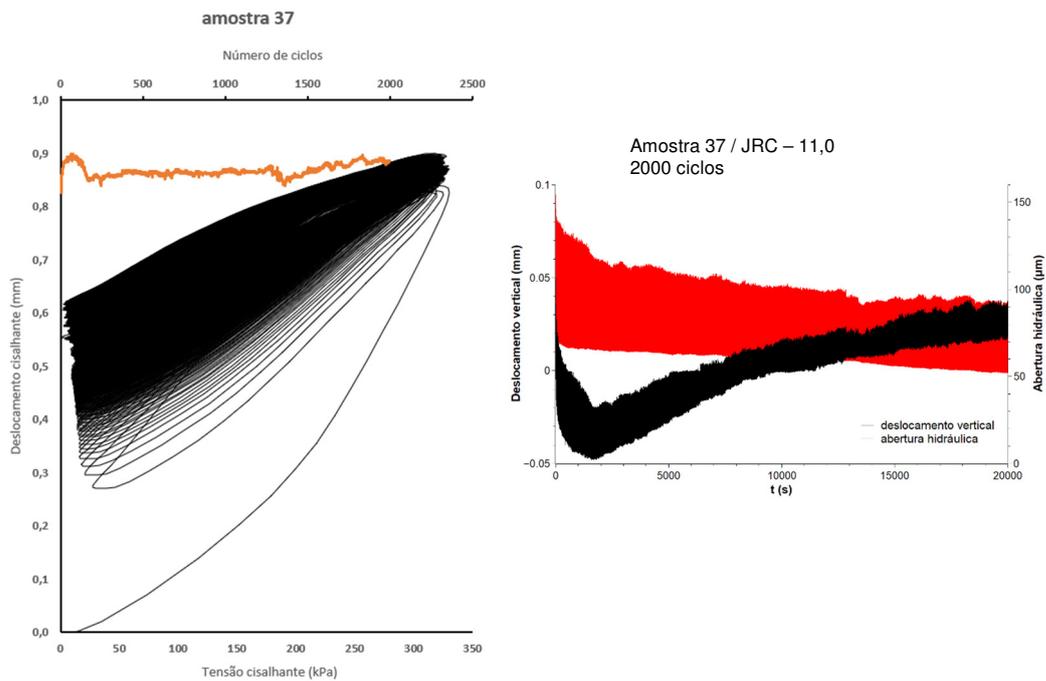


Figura 4.31 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 37.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

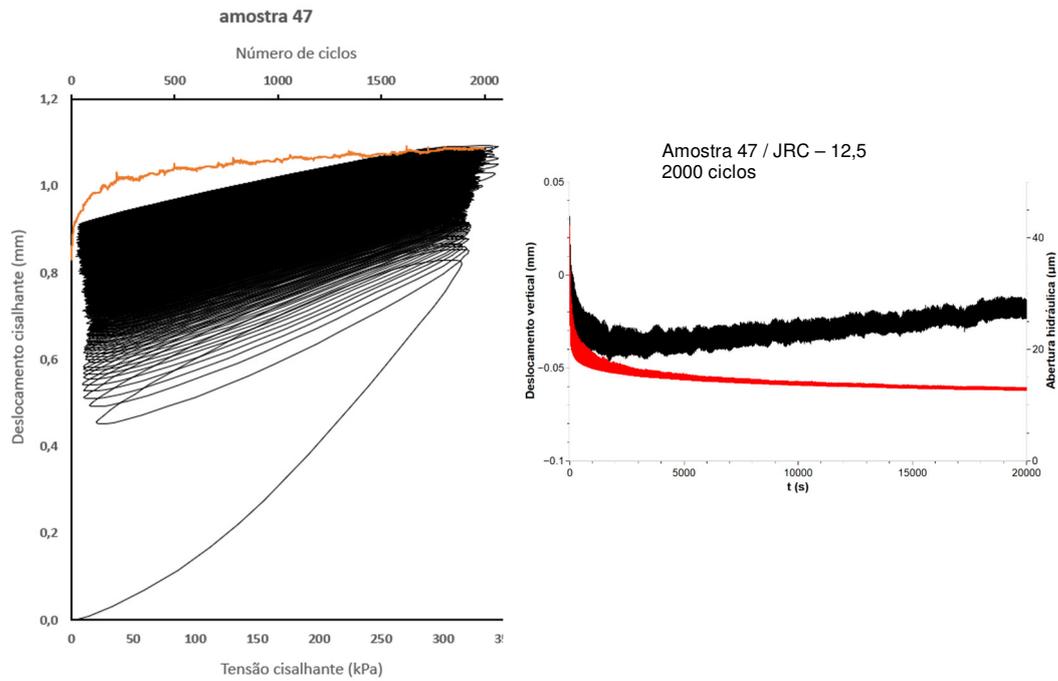


Figura 4.32 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 47.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

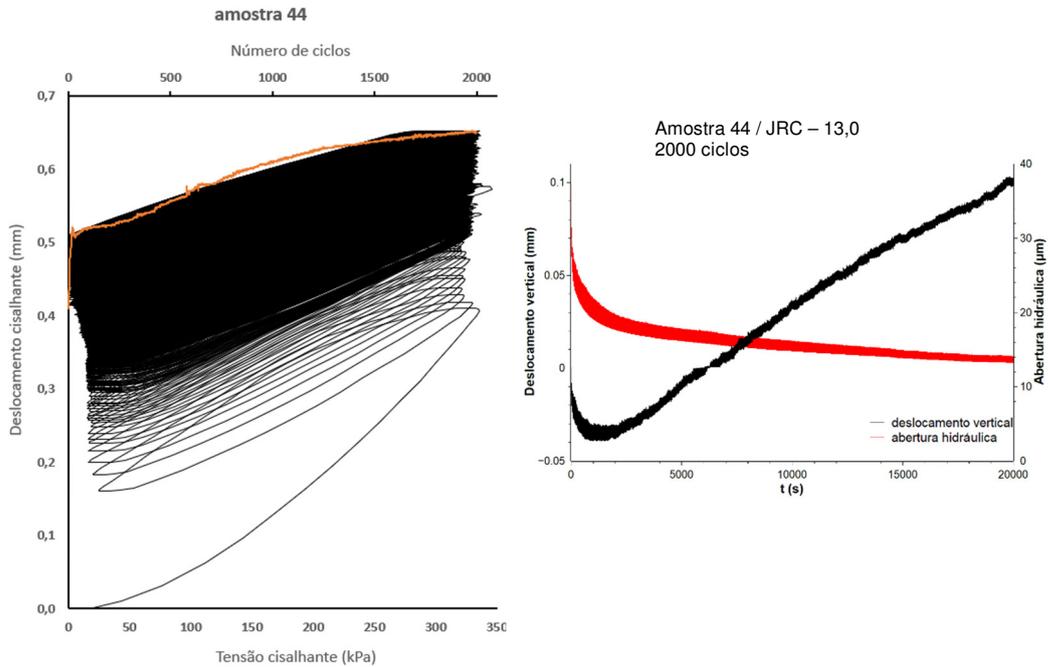


Figura 4.33 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 44.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

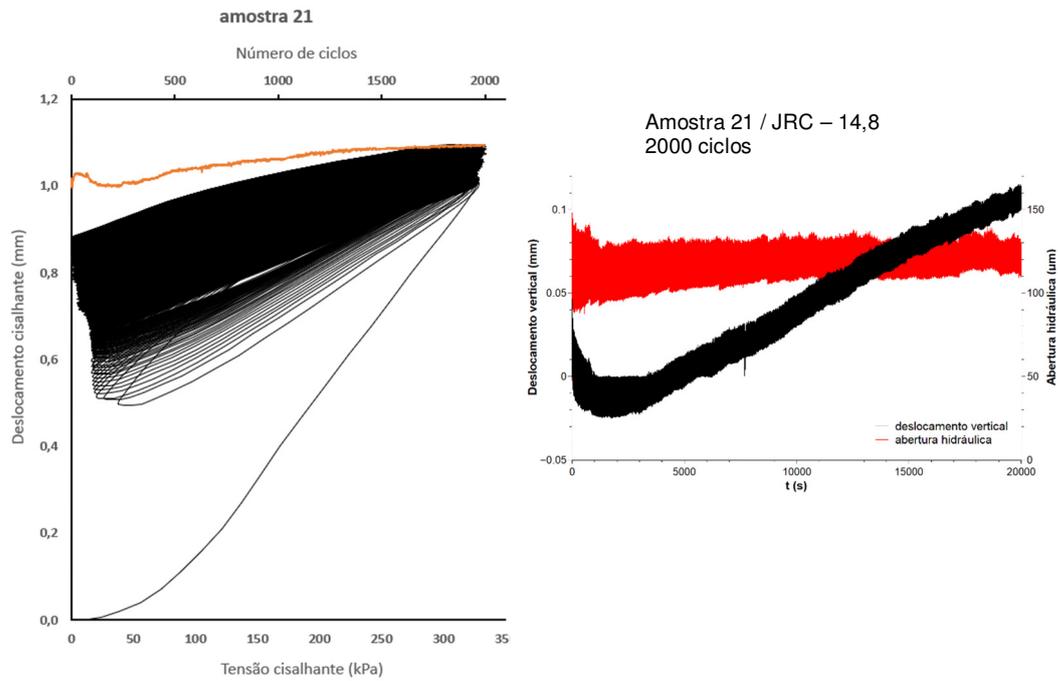


Figura 4.34 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 21.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

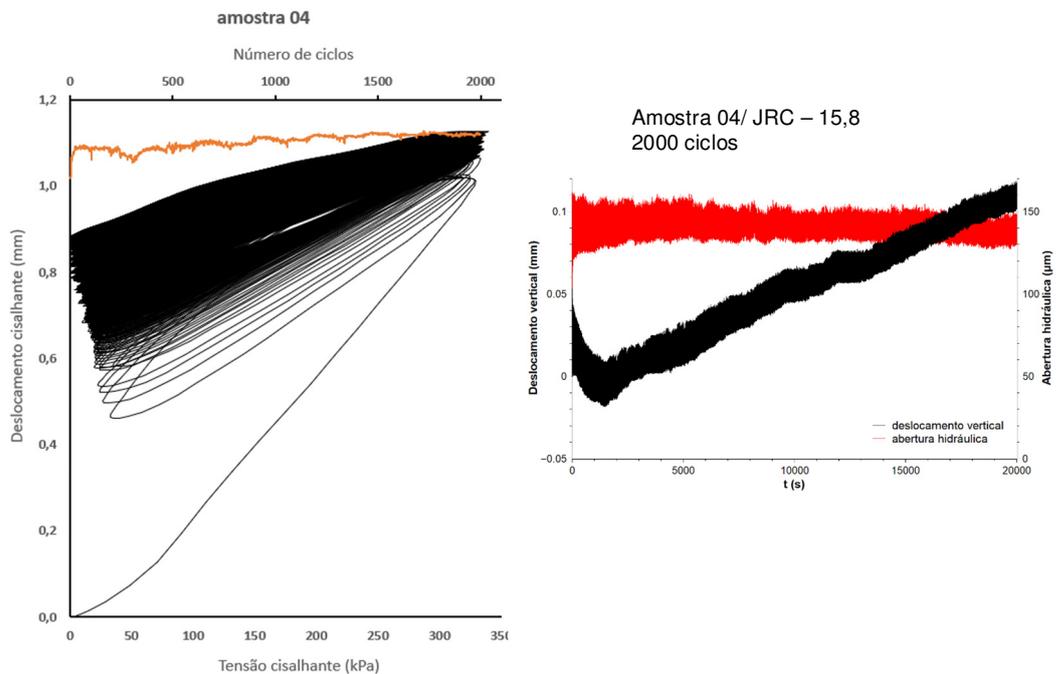


Figura 4.35 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 04.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

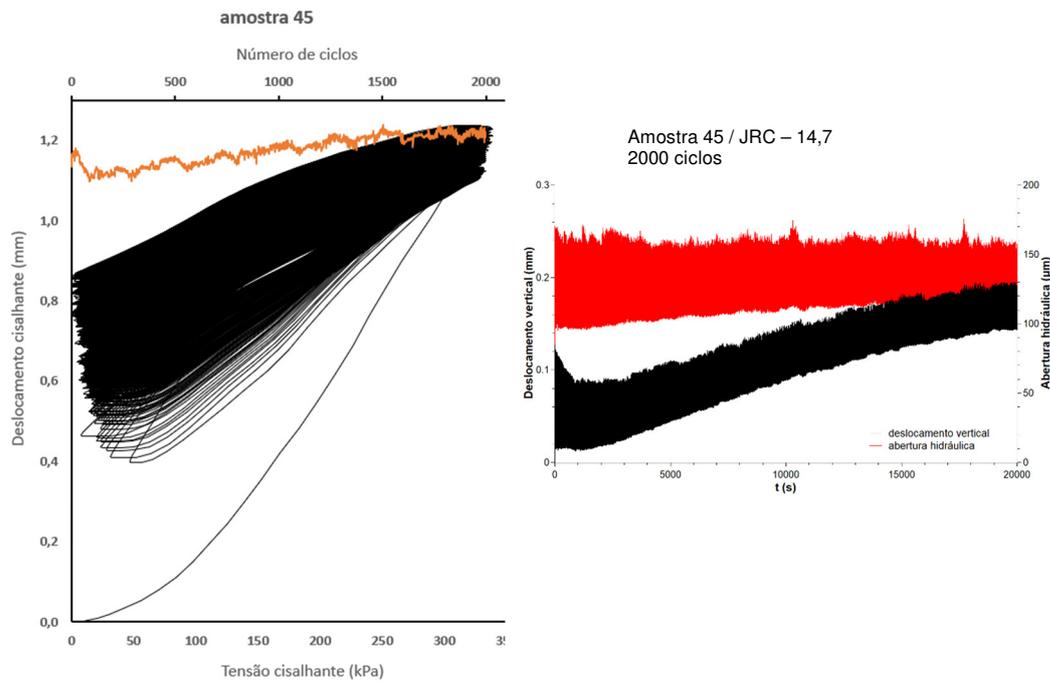


Figura 4.36 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 45.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

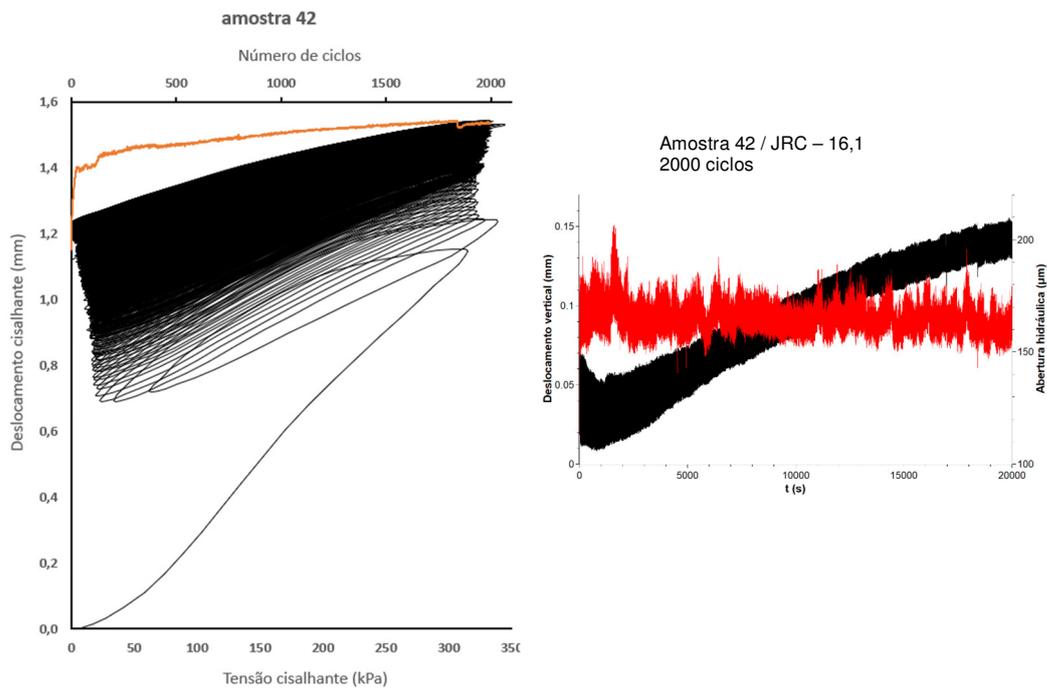


Figura 4.37 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 42.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

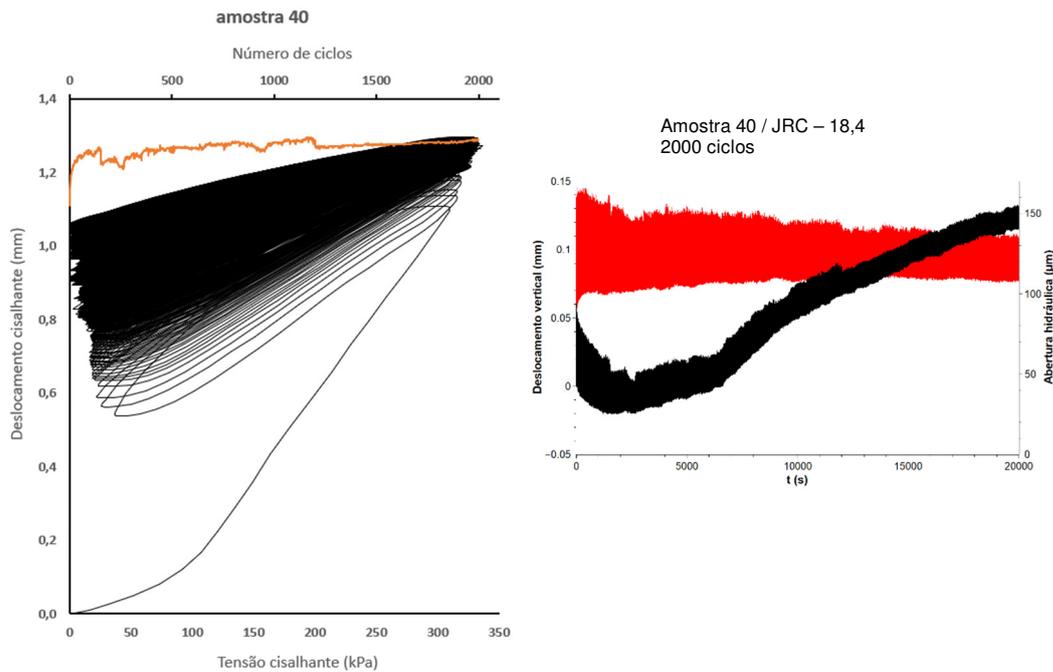


Figura 4.38 – Amplitude do deslocamento versus número de ciclos e variação da abertura hidráulica e deslocamento vertical em função do tempo para amostra 40.

Legenda: — Amplitude máxima do deslocamento / — Cisalhamento cíclico.

Inicialmente, a maioria das amostras apresenta um deslocamento máximo inicial acima de 0,5 mm, que corresponde ao fechamento das juntas e apenas o corpo de prova 44 deslocou 0,15 mm.

A linha do deslocamento máximo acumulado mostra que nos primeiros ciclos a amostra apresentou as maiores amplitudes do deslocamento acumulado e após os 100 primeiros ciclos os deslocamentos foram baixos e por vezes negativos, não produzindo altas amplitudes de deslocamento até a finalização do ensaio. Apenas as amostras 44 e 47 apresentaram uma tendência crescente nos deslocamentos, contudo, ainda baixa.

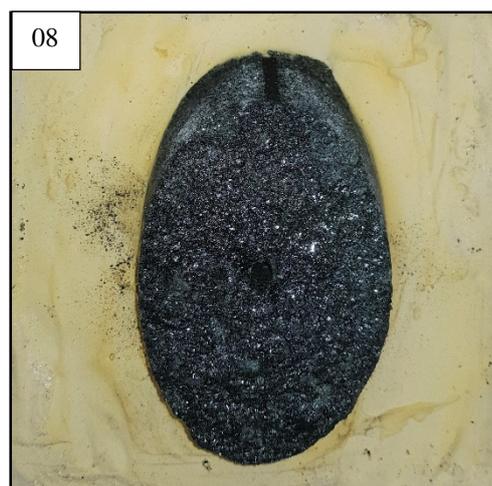
A abertura hidráulica acompanha o deslocamento máximo acumulado e reflete o deslocamento vertical com a variação da rugosidade. Nos primeiros ciclos ocorrem uma diminuição do deslocamento vertical e abertura hidráulica indicando o fechamento da fratura. O grupo de amostras com JRC alto apresentou uma média de abertura hidráulica de 140  $\mu\text{m}$ , enquanto o grupo com JRC baixo apresentou uma variação entre 140 e 15  $\mu\text{m}$ . O comportamento da abertura hidráulica das amostras com JRC alto foi linear, constante, com pontos de máximos e mínimos dentro de um certo limite de valores entre 100 e 150  $\mu\text{m}$ , apesar do deslocamento vertical ser

crecente, linear e constante. Esse comportamento parece estar relacionado com o deslocamento cisalhante, pois as amostras, depois dos primeiros ciclos, avançam pouco, por vezes recuam, ficando paradas numa mesma posição ao longo dos 2000 ciclos, ocorrendo uma variação na abertura hidráulica numa faixa de valores constantes de máximos e mínimos. As amostras 47 e 44 apresentaram abertura hidráulica variando entre 30  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$ , evidenciando um fechamento quase total da fratura. Uma possível explicação para o não fechamento total da fratura é que a distribuição da abertura é muito heterogênea em todas as três dimensões à medida que as superfícies se tocam, mantendo a fratura parcialmente aberta (Chen *et al.* 2000).

#### 4.5.3.2 Corpo de prova após o ensaio

A seguir são apresentadas as imagens das fraturas após o ensaio de cisalhamento cíclico. As Figuras 4.39 e 4.40 mostram o material cominuído depositado no fundo da caixa de cisalhamento, resultado da abrasão dos minerais durante o processo de cisalhamento cíclico.

A totalidade do material é composta por biotita e muscovita e, por vezes, material de preenchimento do dique de fonolito. A tabela 14 mostra a estimativa do material depositado com base no cálculo da área da imagem.



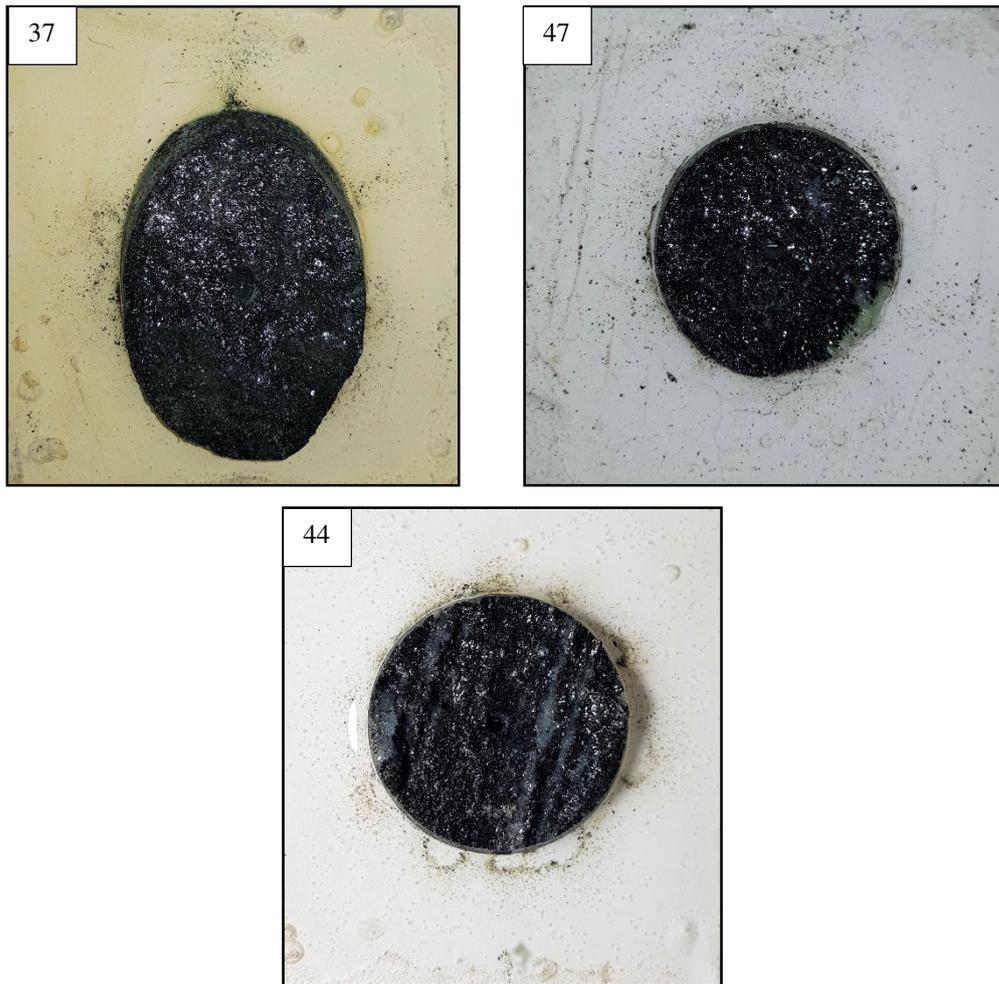


Figura 4.39 – Imagens das fraturas após o ensaio de cisalhamento cíclico para o grupo de amostras com JRC baixo.

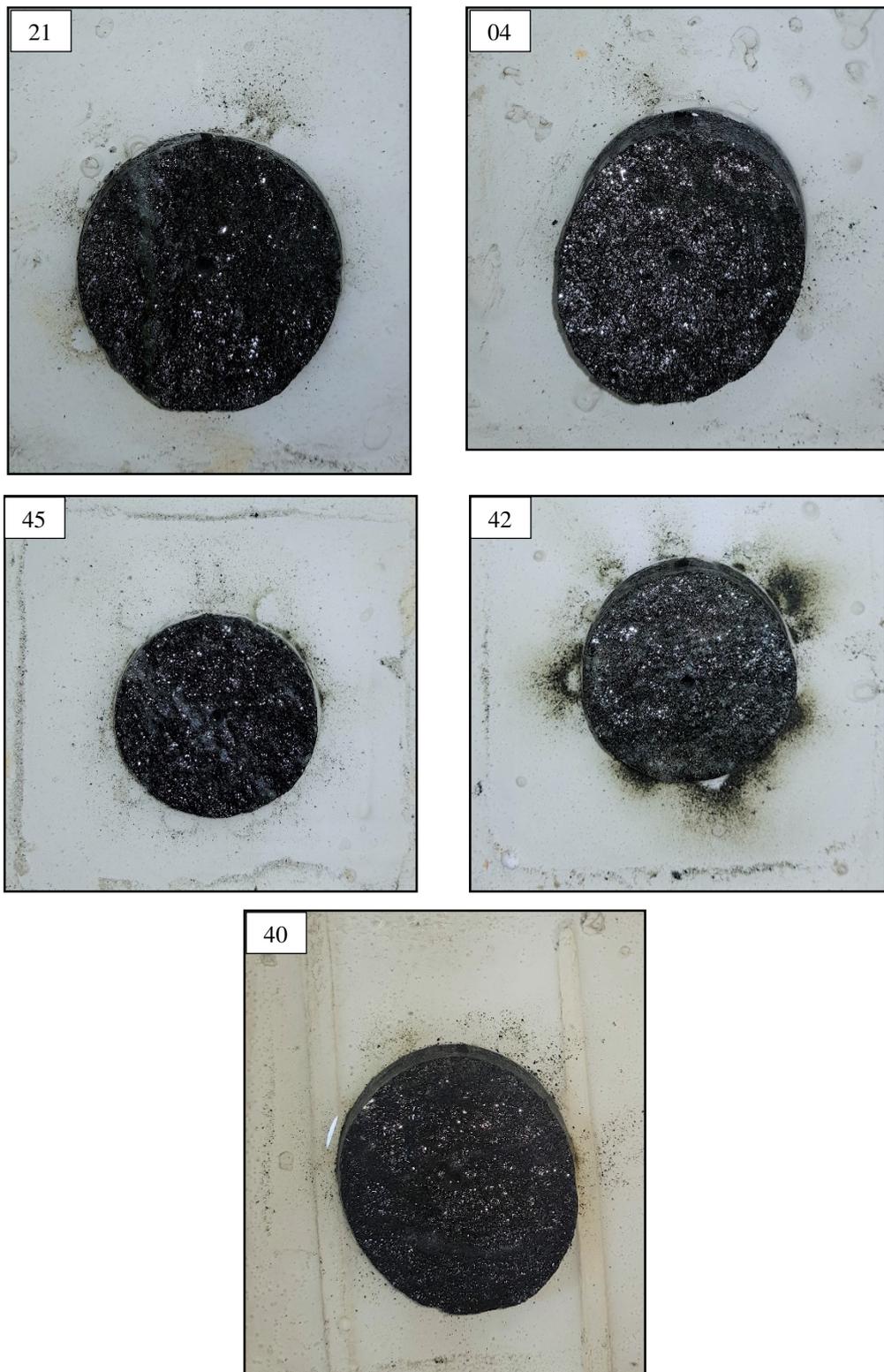


Figura 4.40 – Imagens das fraturas após o ensaio de cisalhamento cíclico para o grupo de amostras com JRC alto.

Tabela 14 – Estimativa em porcentagem do material cominuído depositado no fundo da caixa.

Amostra	JRC	Material depositado (%)
07	11,2	0,5
08	12,2	0,5
37	11,0	0,9
47	12,5	1,6
44	13,0	1,0
21	14,8	1,0
04	15,8	0,4
45	14,7	1,1
42	16,1	5,7
40	18,4	0,9

Diferentemente dos ensaios com tensão normal baixa, os ensaios com tensão normal alta não geraram muito material depositado, sendo a amostra 42 a que possui a maior porcentagem de 5,7%. Esse comportamento pode estar relacionado com o baixo deslocamento cisalhante impossibilitando a quebra da rugosidade em outros pontos de contato da superfície rugosa.

A Figura 4.41 ilustra as fraturas antes e depois do ensaio de cisalhamento cíclico.

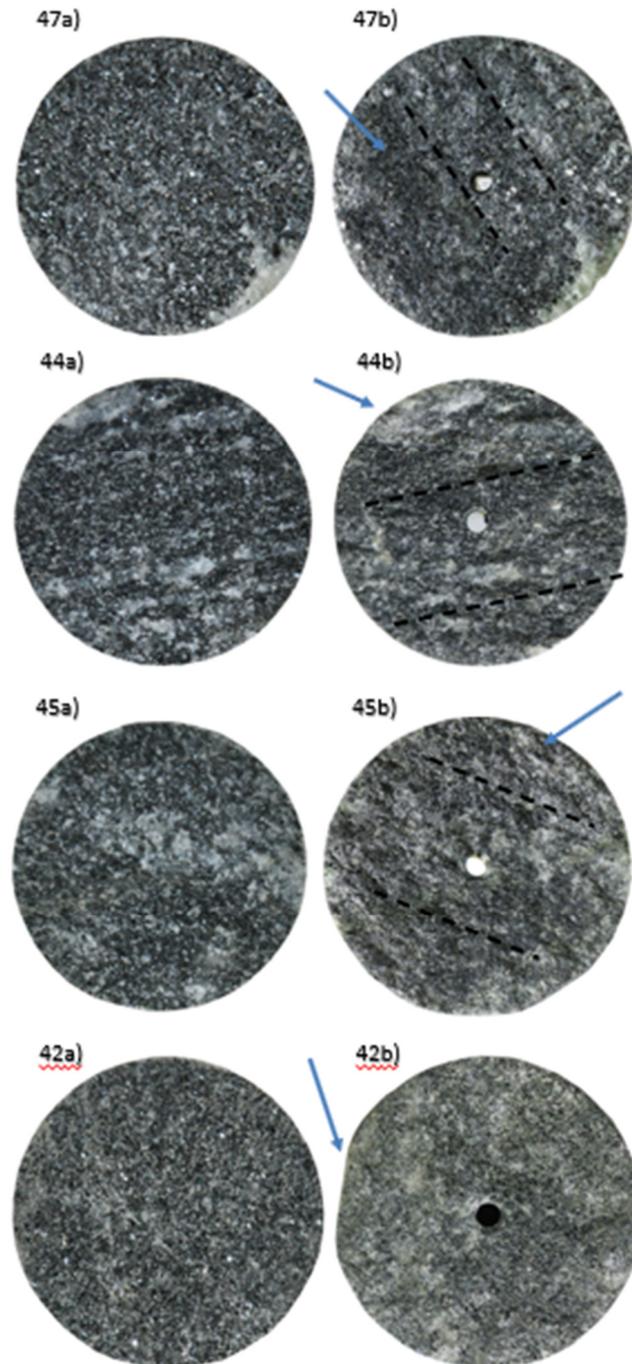


Figura 4.41 – Imagens da fratura antes (a) e após (b) o ensaio de cisalhamento cíclico para as amostras 47 (JRC baixo), 44 (JRC alto), 45 (JRC alto) e 42 (JRC alto).

É possível notar um aumento de áreas brancas, devido ao aumento da área de cisalhada e somente a amostra 42 apresentou uma pequena quebra na aresta.

Devido ao aumento da tensão normal, é possível notar um aumento das áreas de desgaste (áreas brancas) causado pelo fechamento da fratura, porém quebras foram desfavorecidas, talvez pela baixa quantidade de deslocamento acumulado.

A Tabela 15 apresenta os valores de JRC antes e depois do ensaio de cisalhamento cíclico. Verifica-se que o processo de cisalhamento para uma tensão normal alta produziu, em grande parte, reduções nos valores de JRC. Somente em três casos houve aumento, muito provavelmente causado pela quebra da superfície irregular das amostras.

Tabela 15 – JRC antes e depois do ensaio de cisalhamento cíclico.

Amostra	JRC antes		JRC depois		Perfilômetro (depois)
	Z <sub>2</sub>	R <sub>p</sub>	Z <sub>2</sub>	R <sub>p</sub>	
<b>07</b>	11,2	11,7	12,3	13,0	
<b>08</b>	12,2	13,1	9,9	10,4	
<b>37</b>	11,0	11,5	11,8	12,5	
<b>44</b>	13	13,6	12,9	13,6	
<b>47</b>	12,5	12,8	16,6	16,5	
<b>04</b>	15,8	16,3	15,3	15,8	
<b>21</b>	14,8	15,2	14,8	15,3	
<b>40</b>	18,4	18,2	18,4	18,3	
<b>42</b>	16,1	16,5	15,0	15,4	
<b>45</b>	14,7	15,0	18,4	18,3	

## 5 Conclusão e Sugestões

### 5.1 Conclusões

Esta tese apresentou uma abordagem que simula deslocamentos de blocos soltos e empilhados em condições de baixa tensão normal, baixa frequência e tensão cisalhante pré-pico através de modificações no equipamento de cisalhamento direto. A caixa inferior possui movimento apenas na direção do cisalhamento e a caixa superior possui todos os graus de liberdade possíveis (rotação e translação), exceto translação na direção do cisalhamento. A mudança foi importante para tentar compreender o comportamento do deslocamento irreversível relacionado às flutuações diárias de temperaturas, diante de diferentes tipos de rugosidades.

A análise petrográfica indicou as diferentes fases mineralógicas, granulometria, alterações minerais e texturais, deformações intracristalinas e microfissuras a que os corpos de prova foram ensaiados. Foi possível observar que a rocha utilizada era sã, intensamente deformada, por vezes, com bandamento gnáissico de difícil marcação e controle, aspectos importantes para o entendimento das características mecânicas e hidráulicas.

Na caracterização dos índices físicos, foram analisados peso específico seco e porosidade, parâmetros que possuem uma relação linear. Foi observada uma baixa porosidade (1,15%) e peso específico médio de 26,90 kN/m<sup>3</sup>. Rochas metamórficas apresentam no geral baixa porosidade, e o aumento da porosidade ocorre com o grau de alteração ou microfraturamento. A amostra B-1 (microfraturada) apresentou porosidade 70% maior que as amostras sem microfraturas. Os resultados foram similares aos obtidos por Pires (2018), sendo a rocha classificada como sã.

Nos ensaios de compressão uniaxial, os resultados demonstraram baixa deformação axial e resistência à compressão axial média a baixa. Devido aos

microfraturamentos e à difícil marcação do bandamento, os resultados da resistência foram abaixo do esperado para rochas sãs.

A resistência à tração obtida nos ensaios brasileiros apresentou uma média de 7,6 MPa, possuindo alta resistência à tração.

Os ensaios de cisalhamento cíclico demonstraram que o efeito da tensão cisalhante pré-pico associada à baixa tensão normal (100 kPa) e baixa frequência (0,1 e 0,01 Hz) é capaz de gerar deslocamentos acumulados irreversíveis ao longo do tempo, enquanto os ensaios com tensão normal alta geram deslocamentos em um nível bem menor.

Durante os ensaios com tensão normal baixa foram observados que a diminuição da frequência aumentou as amplitudes máximas de deslocamento e também aumentou a abertura hidráulica da amostra com JRC alto. O deslocamento cisalhante foi linear e constante, mesmo para áreas de maior resistência, para ambas as frequências e os maiores deslocamentos ocorreram antes dos 1000 ciclos (0,1 Hz) e 100 ciclos (0,01 Hz). Os corpos de prova com JRC alto apresentaram os maiores deslocamentos cisalhantes e, por vezes, a finalização do ensaio foi antes de 1000 ciclos, contudo, JRC baixos podem conter pontos com rugosidade mais acentuada e causar o rompimento da amostra. Os ciclos de histerese apresentaram áreas bem pequenas variando de 0,00001 a 0,001 kNmm, baixa distorção angular e baixa influência da rigidez.

Diferentemente dos ensaios com tensão normal baixa, o aumento da tensão levou ao fechamento da fratura no primeiro ciclo e baixos deslocamentos cisalhantes durante o ensaio. Os ciclos de histerese apresentaram áreas maiores variando de 0,016 e 0,094 kNmm, maior distorção angular, aumento da rigidez. A abertura hidráulica variou entre 100 e 150  $\mu\text{m}$  e apenas as amostras 47 e 44 apresentaram abertura hidráulica variando entre 30 e 15  $\mu\text{m}$ , influenciada pelo JRC. Devido à alta tensão normal, a abertura hidráulica foi constante e variou pontos de máximos e mínimos dentro de um intervalo de tempo ao longo dos ciclos. Esse comportamento está relacionado com a alta tensão normal e o deslocamento cisalhante, pois nos primeiros ciclos a amostra avança, depois o deslocamento é limitado e por vezes a amostra recua.

O material cominuído durante o cisalhamento cíclico e depositado no fundo da caixa é composto por material micáceo (biotita, muscovita) e pedaços de rocha

quebrados. A quantidade de material cominuído é influenciada pela tensão normal, frequência e deslocamento cisalhante.

Em relação aos danos sofridos na junta, pelo cisalhamento cíclico, observa-se um aumento nas amostras com tensão normal alta, uma explicação seria o aumento da área de contato da junta devido à alta tensão normal.

A utilização do JRC, para quantificação dos danos nas irregularidades das áreas cisalhadas das juntas antes e depois do ensaio, mostrou poucas mudanças significativas, tendo em vista que esse coeficiente é medido sobre um perfil bidimensional, contudo, grande parte dos valores de JRC sofreram redução devido aos danos durante o cisalhamento.

O comportamento dos deslocamentos irreversíveis das amostras ensaiadas foi influenciado pela tensão cisalhante de pré-pico para tensões normais e frequências baixas e para tensões altas o deslocamento foi constante e quase estático, diminuindo pouco a resistência ao cisalhamento para 2000 ciclos e gerando níveis de deslocamentos irreversíveis bem mais baixos. As maiores amplitudes de deslocamento foram para as amostras com JRC alto que possuem as maiores áreas de contato cisalhadas. A maior quantidade de material cominuído depositado após o ensaio foi para as amostras com tensão normal baixa e frequência de 0,1 Hz.

## 5.2 Sugestões

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Comparar a influência do número de ciclos na quebra da rugosidade antes e depois dos primeiros ciclos.
- Ensaios de cisalhamento cíclico em conjunto com ensaios de cisalhamento direto para avaliação e estimativa da resistência ao cisalhamento após os ensaios cíclicos.
- Comparar JRC com valores abaixo de 10 e valores acima de 16, pois valores intermediários apresentam dados variados.
- Comparar parâmetros que definem as envoltórias de cisalhamento da rocha sã com a da rocha fraturada.

## 6 Referências bibliográficas

- Alameda-Hernández, P.; Jiménez-Perálvarez, J.; Palenzuela, J. A.; El Hamdouni, R.; Irigaray, C.; Cabrerizo, M. A., & Chacón, J. (2014). Improvement of the JRC calculation using different parameters obtained through a new survey method applied to rock discontinuities. *Rock mechanics and rock engineering*, 47(6), 2047-2060.
- Almeida, L. C. R. (1999). Estudo Experimental Da Anisotropia De Resistência De Rochas Graníticas E Sua Aplicação A Processos de Desmontes. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, IGEO/UFRJ.
- Barton, N. R. and Bandis, S.C. (1982). Effects of block size on the the shear behaviour of jointed rock. 23rd U.S. symp. on rock mechanics. Berkeley.
- Barton, N.; Bandis, S.; Bakhtar, K. (1985). Strenght, deformation and conductivity coupling of rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, v3, p 121-140.
- Barton, N. and Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, v. 10, p. 1 -54.
- Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.*, v. 6, n4, p.183-226.
- Bakun-Mazor, D.; Hatzor, Y. H.; Glaser, S. D.; Carlos Santamarina, J. (2013). Thermally vs. seismically induced block displacements in Masada rock slopes. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.* 61, 196–211.

- Bakun-Mazor, D.; Yuval, K.; Feldheim, A; Detournay, C.; Hatzor, Y. H. (2020). Thermally-Induced Wedging–Ratcheting Failure Mechanism in Rock Slopes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 53. 10.1007/s00603-020-02075-6.
- Bieniawski, Z. T.; Franklin, J. A.; Bernede, M. J.; Doffaut, P.; Runmel, F.; Horibe, T.; Broch, E.; Rodrigues, E.; Van Heerden, W. L.; Vogler, U. W. (1979). Suggested methods for determining the UCS and deformability of rock materials. *ISRM Commission on Standardisation of Laboratory and Field tests. Publ. Int. J. of Rock Mech. and Mining Sc. and Geomech. Abs*, 16(2), 135–140.
- Bieniawski, Z. T.; Hawkes, I. (1978). Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 15(3), 99–103.
- Cacciari, P. P. (2019). A coupled TRS-DFN-DEM approach to assess the role of rock foliation on the stability of shallow tunnels in discontinuous rock masses. Thesis (Phd). Engineering School of University of São Paulo. São Paulo, SP.
- Cao, C., Xu, Z.; Chai, J., Li, Y. (2019). Radial fluid flow regime in a single fracture under high hydraulic pressure during shear process. *J. Hydrol.* 579, 124142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124142>.
- Cervenka, J.; Kishen, J. M. C.; Saouma, V. E. (1998). Mixed mode fracture of cementitious bimaterial interfaces; part II: numerical simulation, *Engineering Fracture Mechanics* 60(1), 95–107.
- Chen, Z., Narayan, S.; Yang, Z., et al. (2000). An experiment investigation of hydraulic behaviour of fractures and joints in granitic rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 37, 1061–1071.
- Clément C.; Merrien-Soukatchoff V.; Dünner C.; Gunzberger Y. (2008a). Stress measurement by overcoring at shallow depth in a rock slope: scattering of input data and results, *Rock Mechanics and Rock Engineering*. Published on line 12.

- Collins, B. D.; Stock, G. M. (2016). Rockfall triggering by cyclic thermal stressing of exfoliation fractures. *Nat. Geosci.* 9, 395–401.
- Córdova Rodríguez, R. R. (2018). Desenvolvimento de um Equipamento para a Determinação da Resistência ao Cisalhamento Direto de Descontinuidades não Preenchidas em Rochas. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.
- Costa, A. P. L. (2007). Alterabilidade e Caracterização Tecnológica dos Gnaisses Enderbíticos da Porção Norte do Estado do Ceará com Aplicação no Setor de Rochas Ornamental. Tese de doutorado, Instituto de geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 214p.
- Diaz, C. J. V. (2018). Effect of thermal cycles on rock massif stability. PhD thesis, department of geotechnical engineering and geosciences, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Esaki T.; Du S.; Mitani Y.; Ikusada K.; Jing L. (1999). Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint. *Int J Rock Mech Min Sci* 36(5):641–650.
- Esaki T.; Hojo H.; Kimura T.; Kameda N.; Deut Gesell E.; Grundbau. (1991). Shear-flow coupling test on rock joints. In: *Proceedings seventh international congress on rock mechanics*, vol 1. Rock mechanics and environmental protection.
- Fathi, A.; Moradian, Z.; Rivard, P.; Ballivy, G. (2016). Shear mechanism of rock joints under pre-peak cyclic loading condition. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 83, pp. 197-210.
- Fiorucci, M.; Marmoni, G. M.; Martino, S.; Mazzanti, P. (2018). Thermal Response of Jointed Rock Masses Inferred from Infrared Thermographic Surveying (Acuto Test-Site, Italy). *Sensors*, 18, 2221.

- Gasc-Barbier, M.; Girma, G.; Gendre, V. (2014). Laboratory analysis of thermal fatigue in limestone. Eurock 2014, Vigo (Espagne).
- Gasc-Barbier, M.; Merrien- Soukatchoff,, V.; Virely, D. (2021). The role of natural thermal cycles on a limestone cliff mechanical behaviour, Engineering Geology, Volume 293, 106293, ISSN 0013-7952.
- Glade, T.; Crozier, M. (2004). The Nature of Landslide Hazard Impact. In T. Glade, M. Anderson, & M. Crozier (Ed), Landslide Hazard and Risk (pp. 41-75). England: Wiley.
- Greif, V.; Brcek, M.; Vlcko, J.; Varilova, Z.; Zvelebil, J. (2016). Thermomechanical behavior of PravcickaBraná Rock Arch (Czech Republic). Landslides 2016.
- Griffith, A. A. A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London., 221(582–593), 163–198.
- Gunzburger, Y. V.; Merrien-Soukatchoff, V.; Y. Guglielm. (2005). Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: case study of the rochers de valabres slope (France) Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 42 (2005), pp. 331-349.
- Han, G.; Jing, H.; Jiang, Y. (2019). Effect of Cyclic Loading on the Shear Behaviours of Both Unfilled and Infilled Rough Rock Joints Under Constant Normal Stiffness Conditions. Rock Mech Rock Eng (2019).
- Hartlieb, P.; Toifl, M.; Kuchar, F.; Meisels, R.; Antretter, T. (2016). Thermo-physical properties of selected hard rocks and their relation to microwave-assisted comminution. Miner Eng. 2016; 91:34–41.
- Hoek, E.; Bray, J.W. (1981). Rock Slop Engineering. The Institution of Mining and Metallurgy. London. 1981.

Hutson, R. W.; Dowding, C. H. (1990). Joint asperity degradation during cyclic shear. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and* 27(2): 109-119.

ICDD, International Centre for Diffraction Data. PDF-2 dataset, 2006.

Indraratna, B.; Haque, A. (2000). *Shear Behaviour of Rock Joints*, University of Wollongong, Australia. Saeb, S. & Amadei, B. 1990. Modeling joint response under constant or variable normal stiffness boundary conditions, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 27 (3), pp 213-217, Pergamon Press, Great Britain.

Indraratna, B.; Mirzaghobanali A.; Oliveira, D.; Premadasa, W.N. (2012). *Shear Behaviour of Rock Joints Under Cyclic Loading*. 11th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics: Ground Engineering in a Changing World, Australia.

ISRM (1981). *Rock Characterization. Testing and monitoring*. ISRM Suggest. Brow, E. T., Commission on testing and monitoring. International Society for Rock Mechanics. Pergamon Press. 1981.

ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. Geomech. abstr.* 1978.

Jafari, M.K. K.; Amini Hosseini, F.; Pellet, M.; Boulon, O.; Buzzi (2003). Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading. *Soil Dynamics and Earth quake Engineering*, 23, pp. 619-630.

Jafari, M. K.; Pellet, F.; Boulon, M.; Amini Hosseini K. (2004). Experimental study of mechanical behaviour of rock joints under cyclic loading. *Rock Mech Rock Eng.* 37 (1): 3–23.

- Kou, M.; Liu, X.; Tang, S.; Wang, Y. (2019). Experimental study of the prepeak cyclic shear mechanical behaviors of artificial rock joints with multiscale asperities. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 120 (2019) 58–74.
- Lee, H. S.; Park, Y. J.; Cho, Y. J.; You, Y. J. (2001). Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading *Int J Rock Mech Min Sci*, 38 (2001), pp. 967-980.
- Li, Y.; Sun, S. (2019). Analytical prediction of the shear behaviour of rock joints with quantified waviness and unevenness through wavelet analysis. *Rock Mech. Rock Eng.* (2019).
- Liu, R.; Huang, N.; Jiang, Y. (2020). Effect of Shear Direction Change on Shear-Flow-Transport Processes in Single Rough-Walled Rock Fractures. *Transp Porous Med* 133, 373–395 (2020).
- Liu, X.R; M.M. Kou; Y.M. Lu; Y.Q. Liu (2018) An experimental investigation on the shear mechanism of fatigue damage in rock joints under pre-peak cyclic loading condition. *International Journal of Fatigue* 106, 175–184.
- Merrien-Soukatchoff, V.; Gunzburger, Y.; Cécile Clement. (2010). Natural thermal strains close to surface of rock slopes. Measurement and modeling of the “Rochers de Valabres” case *Stabilité des versants rocheux. Rock Slope Stability (RSS 2010)*, Nov 2010, Paris, France. INERIS, pp.18.
- Merrien-Soukatchoff, V.; Gasc-Barbier, M. (2017). Consequences of daily and annual thermal cycles on fracture propagation and rock slopes stability. *the Progressive rock failure conference*, Monte Verità, Switzerland, 5–9.
- Menezes Filho, A. P. Aspectos geológico-geotécnicos de um perfil de alteração de gnaiss facoidal. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, p. 229, 1993.

- Mirzagohobanali, A.; Nemcik, J.; Aziz N. (2013). Effects of cyclic loading on the shear behavior of infilled rock joints under constant normal stiffness conditions. *Rock Mech Rock Eng* 2013;47(4):1373–91.
- Muralha, J.; Grasselli, G.; Tatone, B.; Blumel, M.; Chryssanthakis, P.; Jiang, Y. J. (2013). ISRM suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version. *Rock Mech Rock Eng* 47:291–302.
- Niktabar, S. M. M.; Rao, K. S.; Shrivastava, A. K. (2017). Effect of rock joint roughness on its cyclic shear behavior. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 9, 1071-1084.
- Palchik, V. (1999). Influence of Porosity and Elastic Modulus on Uniaxial Compressive Strength in Soft Brittle Porous Sandstones. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32(4), 303–309. <https://doi.org/10.1007/s006030050050>
- Pasten, C. (2013). Geomaterials subjected to repetitive loading: implications on energy systems. PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, pp 419.
- Pasten, C.; García, M.; Cortes, D. D. (2015). Physical and numerical modelling of the thermally induced wedging mechanism. *Geotechnique Letters* 5(3):186–190.
- Perras, M. A.; Diederichs, M. S. (2014). A review of the tensile strength of rock: concepts and testing. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(2), 525–546.
- Pires, P. B. (2018). Estudo Experimental da Tenacidade de Rochas Gnáissicas para Diferentes Graus de Alteração. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.

- Popescu, M. (1994). A suggested method for reporting landslide causes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 50, 71-74.
- Poturovic, S.; Schubert, W.; Blumel, M. (2015). Comparison of constant normal load and constant normal stiffness (CNS) direct shear tests Eurock 2015 & 64th Geomechanics Colloquium, Salzburg, Austria.
- Puntel, E.; Bolzon, G.; Saouma, V. (2006). A fracture mechanics based model for joints under cyclic loading. *ASCE J EngMech*, 132, pp. 1151-1159.
- Plesha, M. E. (1987). Constitutive models for rock discontinuities with dilatancy and surface degradation. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics* 11(4): 345-362.
- Rasband, W. (2004) *ImageJ - Image Processing and Analysis in Java*. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA.
- Santos, A. T. C. Redução da tenacidade por intemperismo: mecanismo pré-ruptura de maciços rochosos. Trabalho de conclusão de curso de graduação. Departamento de Geologia, IGEO/UFRJ, Rio de Janeiro, p. 69, 2004.
- Sarda, J. P.; Kessler, N.; Wicquart, E.; Hannaford, K.; Deflandre, J. P. (1993). Use of Porosity as a Strength Indicator for Sand Production Evaluation. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 9.
- Shrivastava A. K. (2012). Physical and numerical modelling of shear behaviour of jointed rocks under CNL and CNS boundary conditions. Dissertation, IIT Delhi.
- Shrivastava, A. K. K.; Seshagiri Rao. (2015). Shear Behaviour of Rock Joints Under CNL and CNS Boundary Conditions. *GeotechGeolEng* (2015) 33:1205–1220.

- Ulusay, R. (2015). The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014. 2007–2014.
- Vargas, J. E.; Velloso, R.; Chávez, L.; Gusmão, L.; Amaral, C. (2013). On the effect of thermally induced stresses in failures of some rock slopes in Rio de Janeiro, Brazil. *Rock Mech RockEng* 2013; 46: 123–34.
- Villarraga, C. J. M.; Gasc-Barbier, J.; Vaunat, J.; Darrozes. (2018). The effect of thermal cycles on limestone mechanical degradation, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 109, Pages 115-123, ISSN 1365-1609.
- Vlcko, J.; Greif, V.; Grof, V.; Jezny, M.; Petro, L.; Brcek, M. (2009). Rock displacement and thermal expansion study at historic heritage sites in Slovakia. *Environ. Geol.* 58, 1727\_1740.
- Vogler, D.; Amann, F.; Bayer, P; et al. (2016). Permeability Evolution in Natural Fractures Subject to Cyclic Loading and Gouge Formation. *Rock Mech Rock Eng* 49, 3463–3479 (2016).
- Wen-chen, F.; Cao, P.; Long, L. (2018). Degradation of joint surface morphology, shear behavior and closure characteristics during cyclic loading. *J. Cent. South Univ.* (2018) 25: 653–661.
- Whittaker, B. N.; Singh, R. N.; & Sun, G. (1992). *Rock Fracture Mechanics: principles, design and applications.* (Vol. 570). Elsevier Amsterdam.
- Zhang, Z.; Nemcik, J. (2013). Fluid flow regimes and nonlinear flow characteristics in deformable rock fractures. *J. Hydrol.* 139–151.